

# Conception acoustique d'une salle – Intérêt du prototypage et principe de conception de maquette

école \_\_\_\_\_  
normale \_\_\_\_\_  
supérieure \_\_\_\_\_  
paris – saclay \_\_\_\_\_

Caroline DE SA - Hélène HORSIN MOLINARO

Edité le 24/03/2017

L'acoustique en architecture a pour objectif d'offrir la qualité de son la plus adaptée aux lieux d'écoute que peuvent être des salles de spectacles (opéra, cinéma, théâtre...), mais aussi aux lieux publics que sont les salles dédiées au sport (gymnase, piscine...) ou les halls de transit (gare, aéroport ...).

La qualité acoustique d'une salle de spectacle est fonction de l'isolement acoustique de la salle vis-à-vis de l'extérieur, et de la perception des sources sonores présentes dans la salle ; ce second point, associé au mode de propagation du son dans la salle, est traité dans cette ressource.

Une onde sonore lors de sa propagation (figure 1) est soumise à des phénomènes de réflexion, diffraction, diffusion ou absorption par les obstacles rencontrés (sol, murs et plafond, mobilier ...). L'onde directe et les ondes réfléchies se superposent et contribuent à la qualité du son perçu (figure 2).

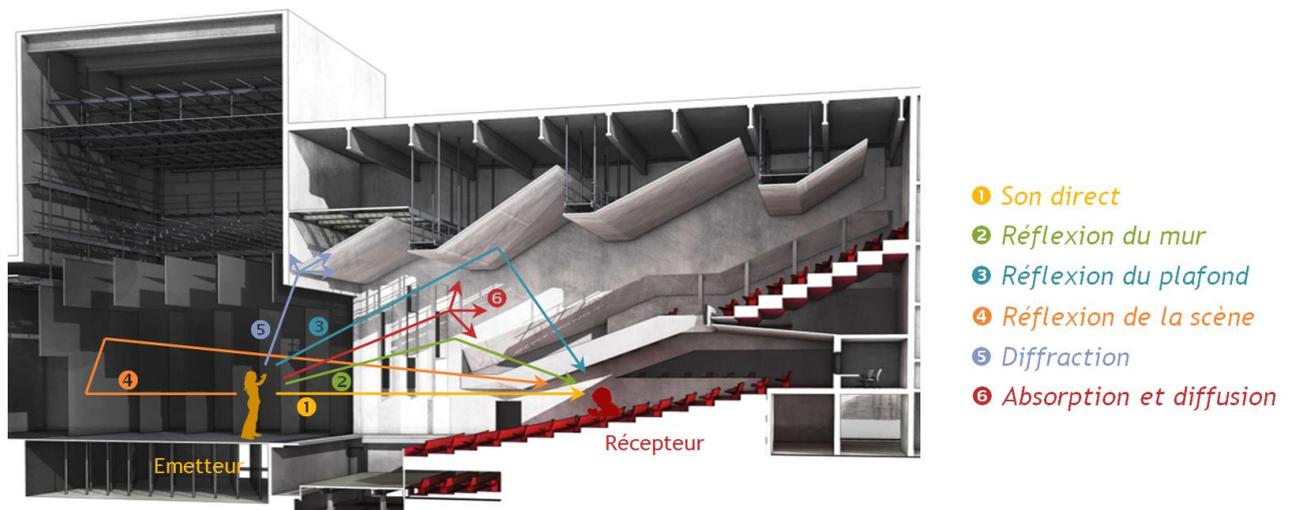


Figure 1 : Propagation d'une onde sonore dans un auditorium  
D'après « Pour la science », dossier hors série n°32, juil/oct 2001, Image de l'auditorium [1]

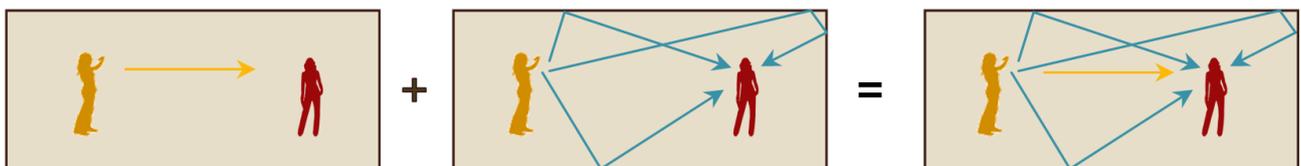


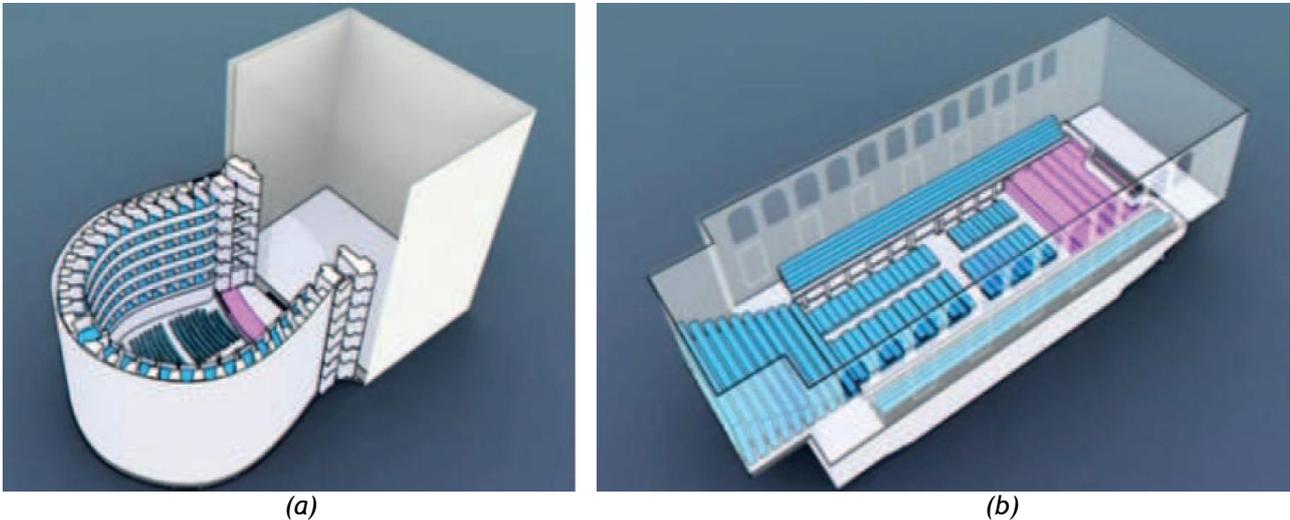
Figure 2 : L'onde directe et les ondes réfléchies se superposent et contribuent à la qualité du son perçu

Cette ressource présente le cadre de modélisation de la propagation des ondes sonores et son influence sur l'acoustique d'une salle de concert ; l'apport des maquettes acoustiques en complément des outils classiques est montré, les principes de conception d'une maquette à échelle réduite sont expliqués.

# 1 – Contexte

Les attentes associées à une salle de concert divergent :

- Une **salle d'opéra** est avant tout un théâtre (figures 3a et 4a) : l'attention du spectateur se tournant sur la scène, l'orchestre est situé dans la fosse sous l'avant scène pour être le moins visible possible. Les distances entre acteurs et spectateurs sont aussi réduites que possible, d'où la présence de nombreux niveaux de balcons ; pour favoriser la bonne compréhension des textes chantés, la **réverbération** (paragraphe 2.2) du son doit être **courte**.
- Une **salle de concert philharmonique** privilégie les sons riches et volumineux, avec un **volume acoustique conséquent** et une **réverbération latérale** (concept « boîte à chaussure », figures 3b et 4b). La distance entre auditeurs et musiciens est a priori moins critique que pour un opéra. Néanmoins, il existe des limites aux dimensions des grandes salles de concert du fait de la puissance d'un orchestre symphonique non expansive et de l'écho désagréable généré par une salle trop vaste. De plus, lorsque la capacité d'une salle est augmentée, les murs sont écartés et les réflexions sonores diminuent ; le son manque alors de réflexions donc de présence et de puissance.



(a) (b)  
Figure 3 : Configuration des salles d'opéra (a) et de concert philharmonique (b)



(a) Salle de l'opéra Garnier de Paris (1875),  
Image Arnaud Chicurel/Hemis/Corbis [2]

(b) Salle du Musikverein de Vienne (1870),  
Image Vienna Concert [3]

Figure 4 : Exemples de salles d'opéra (a) et de concert philharmonique (b)

Pour la musique symphonique, un espace réverbérant est nécessaire pour une bonne qualité d'écoute ; l'enjeu est d'ajuster le temps de réverbération de l'onde sonore pour contrôler la réverbération d'une salle. L'écoute peut en effet être perturbée lorsque l'on entend à deux

reprises un son à l'identique ou légèrement altéré, une fois en provenance de la scène, et une seconde fois depuis une autre direction. Il est donc nécessaire d'éviter le phénomène d'écho.

## 2 – Caractéristiques de l'acoustique dans une salle

### 2.1 - Propagation des ondes sonores

Les ondes sonores émises par une source située dans une salle se propagent dans l'air vers les limites du volume et entrent en contact avec les parois ou les obstacles situés dans la salle. Leur comportement depuis leur émission obéit à des lois dépendant principalement des caractéristiques du signal émis et de l'impédance des matériaux rencontrés.

Prenons un fluide caractérisé initialement par sa masse volumique  $\rho_0$ , sa pression  $P_0$  et sa vitesse  $v_0$  nulle. Les ondes acoustiques dans ce fluide perturbent cet état initial, amenant le fluide à un état caractérisé par  $\rho(\vec{r}, t)$ ,  $P(\vec{r}, t)$  et  $\vec{v}(\vec{r}, t)$ . On peut alors poser :  $\delta\rho = \rho - \rho_0$  la variation de masse volumique du fluide et  $p = P - P_0$  la surpression acoustique.

La propagation des ondes sonores peut alors être définie à l'aide des trois lois fondamentales de l'acoustique en milieu fluide, en considérant l'approximation acoustique<sup>1</sup> de faible modification de l'état du fluide :

- **La conservation de la masse :** 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) \approx \frac{\partial(\delta\rho)}{\partial t} + \rho_0 \text{div}(\vec{v}) = 0$$
- **L'équation du mouvement**, qui exprime la première loi de Newton pour les fluides : on considère que la viscosité est négligeable et que les seules forces prises en compte sont les forces de pression (la pesanteur est négligée) : 
$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla P + \vec{f}_v$$

avec  $\vec{f}_v$  force volumique statique (e.g.  $\vec{f}_v = -\rho \vec{g}$ ). Cette force est compensée par le gradient de pression statique  $P_0$ .

- **L'équation d'état thermodynamique de l'air :** on considère un caractère isentropique de la propagation des ondes sonores :

$$\chi_s = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial t} \right)_s \approx \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

avec  $\chi_s$  le coefficient de compressibilité isentropique.

Par combinaison de ces équations et développements limités (dus à l'hypothèse de variations faibles des variables  $v$ ,  $P$  et  $\rho$ ), on obtient l'équation d'onde (équation de d'Alembert)<sup>2</sup>:

$$\Delta p - \rho_0 \chi_s \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \approx \Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad \text{avec } c \text{ la célérité des ondes.}$$

Les principaux facteurs qui interviennent dans la structure du champ rayonné sont :

- La source sonore,
- Le milieu de propagation,
- La nature des parois,
- La nature des obstacles.

<sup>1</sup> La mécanique des fluides est non-linéaire ; la linéarisation des équations entraîne des approximations liées aux hypothèses de départ : petits mouvements, description approchée du fluide non-visqueux par les équations d'Euler, transformation réversible du fluide (à entropie constante).

<sup>2</sup> L'équation de d'Alembert décrit la variation dans le temps et dans l'espace d'une quantité ondulante. Elle est nommée d'après Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) qui l'énonça dans ses *Recherches sur les cordes vibrantes* en 1747, c'est historiquement la première équation d'onde.

L'approche exacte ou ondulatoire, qui consiste à résoudre l'équation de propagation des ondes dans le volume  $V$  de la salle, n'est quasiment jamais possible. On a donc recours à des modélisations (présentant néanmoins des limitations) pour déterminer le champ acoustique dans le volume  $V$  de la salle, connaissant la géométrie de cet espace, les propriétés acoustiques des parois et les caractéristiques des sources sonores présentes dans cet espace.

## 2.2 - Réverbération : définition et modèle

L'ensemble des phénomènes cités précédemment peut aussi être étudié de manière approchée en observant, via une **approche géométrique** de propagation des ondes sonores sous forme de rayons, la **réponse mesurée en un point de la salle suite à une émission impulsionnelle en un autre point**.

La réponse impulsionnelle de la salle peut alors être modélisée comme une séquence obtenue des réflexions parvenant au récepteur, appelée **échogramme** (figure 5). Statistiquement, la densité d'échos parvenant au récepteur varie avec le carré du temps. Au bout d'un certain délai, elle est telle que l'on peut considérer les échos sous un angle statistique. C'est le domaine que l'on appelle de la **réverbération**. Cette réverbération influe sur la qualité acoustique d'une salle.

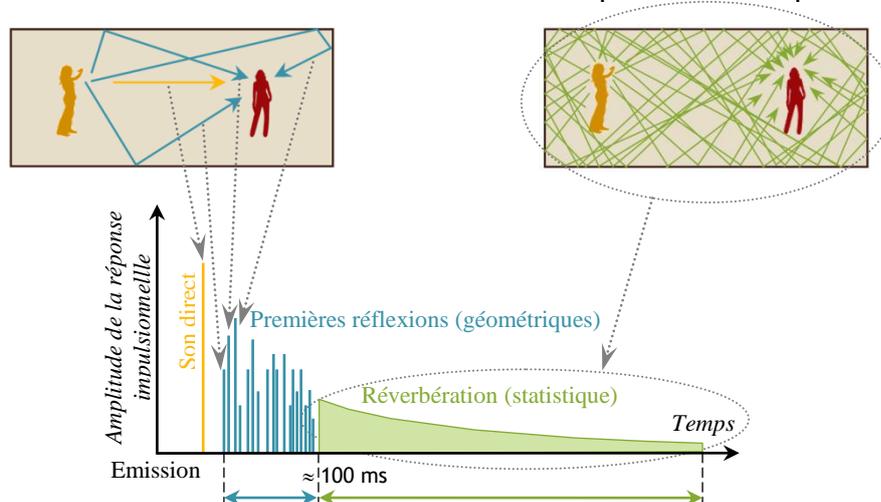


Figure 5 : Modélisation de la réponse impulsionnelle d'une salle, d'après Techniques de l'ingénieur

Pour mesurer le caractère réverbérant d'une salle, on peut définir le temps de réverbération  $TR_{60}$  d'une salle : temps nécessaire après arrêt de la source sonore pour observer une décroissance de 60 décibels du niveau sonore mesuré dans la salle. Une première expression de ce temps de réverbération en fonction des caractéristiques est fournie par la loi de Sabine<sup>3</sup> :

$$TR_{60} = \frac{0,16V}{A} = \frac{0,16V}{\sum_i \alpha_i S_i}$$

avec  $V$  le volume de la salle,  $A$  l'aire d'absorption équivalente de la salle,  $\alpha_i$  le coefficient d'absorption de la paroi  $i$ ,  $S_i$  la surface de la paroi  $i$ .

Les caractéristiques des parois ou des obstacles présents dans la salle ont donc une influence sur le temps de réverbération ; les types de parois seront donc choisis en fonction du temps de réverbération souhaité de la salle.

La formule de Sabine a été établie en ne considérant que le champ réverbéré (ou diffus) avec une répartition parfaitement homogène du champ réverbéré dans la salle, champ réverbéré de plus

<sup>3</sup> Du nom du physicien américain Wallace Clement Sabine (1868-1919)

considéré constitué d'une infinité d'ondes planes arrivant de toutes les directions. Cette hypothèse n'est jamais observée en pratique mais l'on peut s'en approcher et rester dans le domaine de validité de cette formule sous certaines conditions :

- La salle doit être peu absorbante,
- Les dimensions de la salle doivent être assez grandes,
- La salle doit être de forme simple (parallélépipédique),
- L'absorption de propagation dans le fluide doit être négligeable en regard de l'absorption due aux parois.

### 2.3 - Réverbération : caractéristiques souhaitées

L'absence de réverbération dans une salle entraîne un rendu dur et sec de la musique ; une bonne qualité musicale se trouve dans la prolongation du son dont la durée dépend de l'usage de la salle :

- La réverbération dans un auditorium présente une durée de 1 à 2,5 secondes,
- Les orgues dans une église nécessitent pour un son de qualité, de longues durées de réverbération.
- A contrario, pour une bonne compréhension du texte la réverbération n'est pas souhaitable pour un orateur, elle est donc courte, 0,8 s au maximum ; au-delà de cette valeur, il y a chevauchement des syllabes.

Pour les salles du type auditorium, l'expérience a permis de définir un temps de réverbération optimal en fonction de leur utilisation. Ce temps de réverbération varie approximativement comme la racine cubique du volume. Une tendance pour le temps de réverbération est fournie figure 6. Néanmoins, ceci ne constitue qu'une tendance. En effet, de bonnes salles peuvent s'écarter sensiblement des valeurs indiquées car d'autres caractéristiques sont tout aussi importantes, comme la géométrie, les réflexions latérales (effet d'espace)...

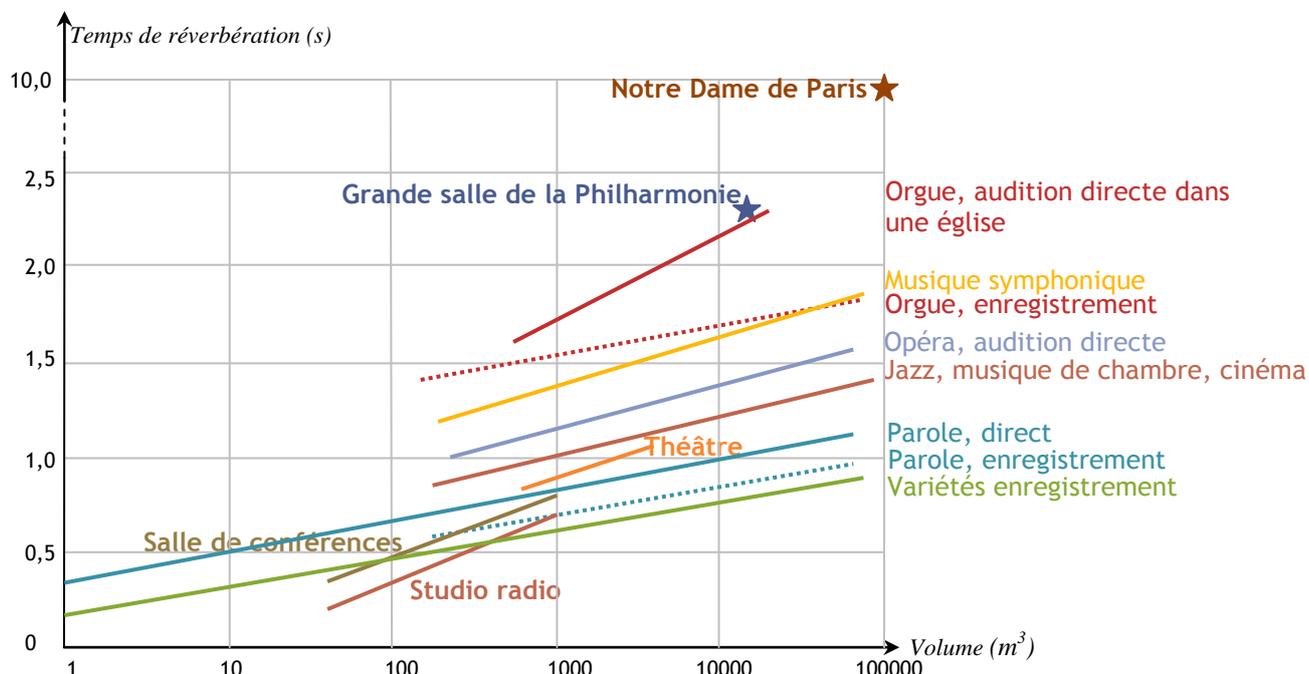


Figure 6 : Temps de réverbération optimal des auditoriums en fonction de leur volume et de leur utilisation, d'après G. Krauss, F. Kuznik, R. Yezou [4] et d'après R. Lamoral

Pour remédier aux approximations de calcul du temps de réverbération via la formule de Sabine, il est possible de simuler plus précisément la propagation des rayons sonores au sein des salles, en considérant une approche géométrique (figure 7). L'approche géométrique permet de calculer

des réponses impulsionnelles, d'avoir accès à presque tous les indices objectifs utilisés en acoustique des salles et de produire des simulations sonores.

Néanmoins, les principales faiblesses de la modélisation géométrique résident dans la difficulté à modéliser la diffraction et la réflexion diffuse sur les surfaces non planes. La modélisation des sources sonores est, elle aussi, délicate. Les problèmes de diffraction et de diffusion limitent notamment la précision des résultats dans les basses fréquences.

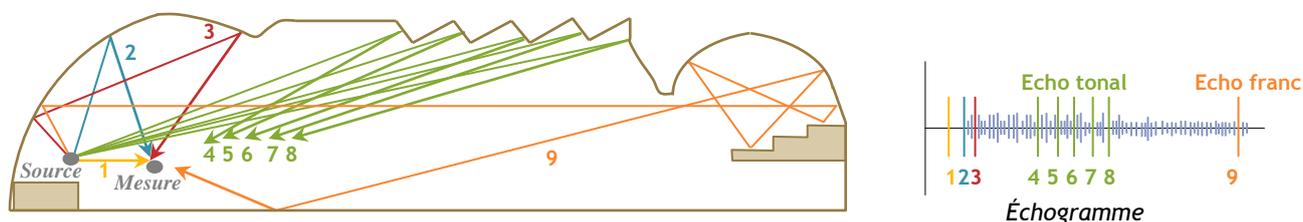


Figure 7 : Approche géométrique et visualisation des échos multiples dans une salle de forme complexe, D'après Techniques de l'ingénieur.

Prévoir le temps de réverbération d'une salle reste donc approximatif avec ces approches géométriques ou statistiques, même si ces techniques sont de plus en plus utilisées et améliorées. En complément de ces approches, l'utilisation de maquettes se révèle donc pertinent pour l'étude de structures complexes.

### 3 – Maquette acoustique

L'utilisation de maquettes acoustiques tridimensionnelles fait suite à diverses premières tentatives de mise au point de simulations par modèle physique ou analogique de la propagation en espace clos. Ainsi, en 1913, Sabine étudie la formation et la propagation d'échos en produisant des photographies de fronts d'onde en deux dimensions des sections horizontale et verticale des modèles réduits de différents théâtres américains. Il utilisa une étincelle électrique comme source lumineuse. En 1934, Spandöck<sup>4</sup> réalise des mesures en trois dimensions à une échelle de 1/5<sup>e</sup>. À la même époque, Dungen<sup>5</sup> établit les lois de similitude appliquées à l'acoustique qui permettent de définir les premières règles de réduction d'échelle en acoustique. En 1965, afin d'étudier les propriétés sonores de théâtres antiques, Canac<sup>6</sup> réalise une série de mesures sur des maquettes (figure 8) à l'aide d'ultrasons dont la fréquence est choisie en fonction des lois de similitude ; la longueur d'onde est réduite selon le facteur d'échelle de la maquette.



Figure 8 : Maquette du théâtre d'orange, extrait d'un document vidéo « Acoustique des théâtres antiques » (1966), document consultable sur le site CERIMES [5].

<sup>4</sup> Friedrich Spandöck (1904-1966) acousticien allemand

<sup>5</sup> Frans-H van den Dungen (1898-1965) mathématicien belge

<sup>6</sup> François Canac (1886-1969) acousticien français

### 3.1 - Lois de similitude

Les lois de similitude s'expliquent en faisant référence à deux relations fondamentales :

$$\text{célérité} = \frac{\text{distance}}{\text{temps}} = \text{fréquence} \times \text{longueur d'onde}$$

La modélisation sur maquette réduite repose ainsi sur le principe de similitude qui exprime que les ondes sonores se propagent dans une maquette de la même manière que dans la salle correspondante à l'échelle 1, à ceci près que les longueurs d'onde des sons émis dans la maquette doivent être transformées dans le rapport d'échelle  $1/N$  de la maquette :

Dimensions	Echelle 1	Maquette échelle $1/N$
Longueur	$l$	$l/N$
Fréquence	$f$	$f.N$
Temps	$t$	$t/N$

Figure 9 : Tableau de réduction des dimensions dans une maquette

Le tableau de réduction (figure 9) est valable en supposant que la célérité des ondes est la même dans la maquette échelle réduite et dans la salle échelle 1, c'est à dire que la température et la pression statique sont les mêmes. Ainsi, dans une maquette au  $1/20^e$ , la bande des fréquences audibles correspond à la bande [400 Hz - 400kHz], dont la majeure partie est située dans l'ultrasonore (au delà de 20kHz).

### 3.2 - Atténuation de propagation en hautes fréquences

Dans les fluides, l'absorption du son a trois origines :

- La viscosité, se traduisant par des forces de cisaillement entre particules (donnant lieu à une transformation d'énergie acoustique en chaleur),
- Les échanges thermiques, par conduction entre particules voisines, d'une part, et par rayonnement électromagnétique, de l'autre.
- Des phénomènes de relaxation moléculaire impliquant des pertes.

Il est possible de tenir compte des deux premiers phénomènes en rétablissant une équation de propagation du son à partir des lois fondamentales : l'équation du mouvement fait intervenir des forces de frottement, et celle de compressibilité des échanges de chaleur (la transformation n'est plus rigoureusement adiabatique). On obtient des coefficients  $\alpha_v$  et  $\alpha_{th}$  exprimant respectivement les effets de la viscosité et ceux des échanges thermiques. Ils sont tous deux proportionnels au carré de la fréquence et inversement proportionnels au cube de la célérité dans le fluide, mais dépendent peu de la température.

Leur somme  $\alpha_c$ , appelée absorption classique, est calculable par les lois fondamentales de la physique des milieux continus. L'écart entre les valeurs mesurées réelles de  $\alpha$  et celles calculées de  $\alpha_c$  conduit à introduire l'absorption anormale ou moléculaire  $\alpha_m$ . On ne peut rendre compte de  $\alpha_m$  qu'en faisant intervenir la nature discontinue du milieu (molécules) et un transfert d'énergie moléculaire avec pertes. Le coefficient d'absorption total  $\alpha$  prend la forme :

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_{th} + \alpha_m = \alpha_c + \alpha_m$$

Dans l'air, on observe une dépendance avec la fréquence de l'absorption : les infrasons se propagent à de très grandes distances (milliers de kilomètres), contrairement aux ultrasons,

absorbés sur quelques mètres, voire quelques centimètres. L'absorption moléculaire est due à des phénomènes d'activation (changement d'état) des molécules d'oxygène  $O_2$  et d'azote  $N_2$ , catalysés par la vapeur d'eau :  $\alpha_m$  dépend fortement de la température et de l'humidité. Elle domine dans les fréquences audibles. Ces différentes contributions à l'absorption acoustique dans l'air sont fournies dans la figure 10, pour une pression statique de 1013 hPa (pression atmosphérique), une température de 20°C et une humidité relative<sup>7</sup> de 40 %. On y voit les trois contributions : absorption classique, relaxations d' $O_2$  et de  $N_2$ .

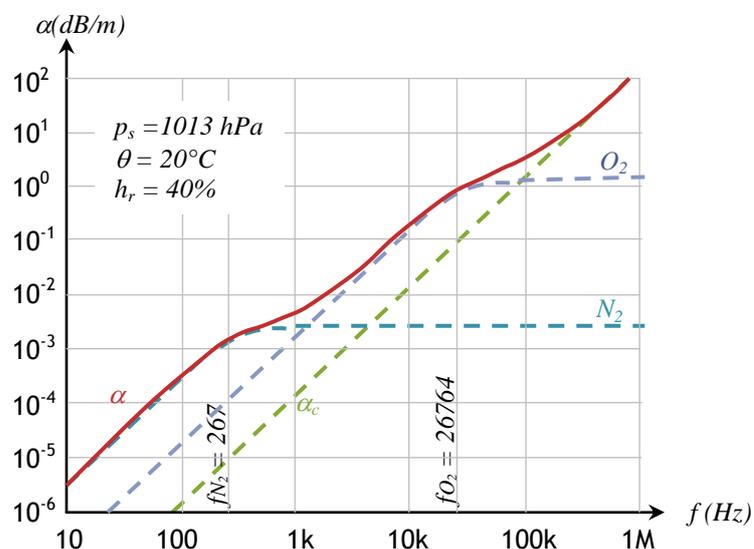


Figure 10 : Coefficient d'absorption du son dans l'air, en fonction de la fréquence, d'après Rossi.

La figure 11 donne également l'absorption totale en fonction de l'humidité relative. On y voit l'influence d'une part de la fréquence et d'autre part de l'humidité relative sur le coefficient d'absorption de l'air.

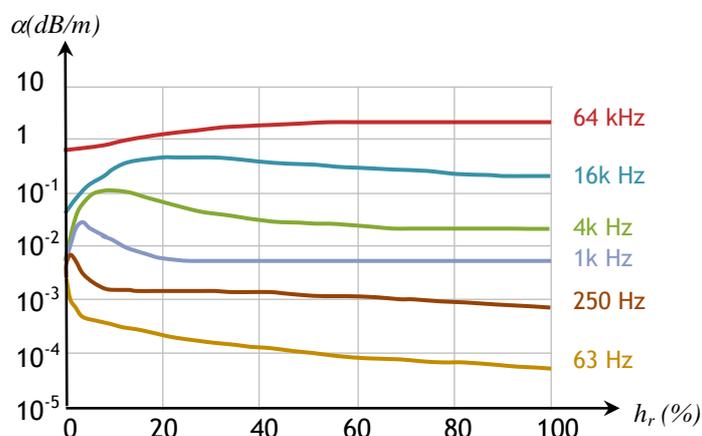


Figure 11 : Absorption du son pour quelques fréquences dans l'air à 20 °C, en fonction de l'humidité relative  $h_r$ .

En conclusion, dans une maquette, une onde de fréquence  $f_N$  subit donc une absorption de propagation nettement plus importante que cette même onde à une fréquence  $f$  dans la salle réelle. Ce surplus d'atténuation introduit dans les mesures un biais d'autant plus grand que l'échelle est réduite.

<sup>7</sup> Humidité relative,  $h_r$ , ou degré hygrométrique, correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température. Elle mesure le rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions.

Les solutions pour remédier à ce problème consistent à :

- Remplacer l'air par un autre gaz au sein de la maquette : **azote, air déshydraté**. Cette solution permet de compenser le phénomène jusqu'à environ 50 kHz. Au-delà l'atténuation reste trop importante. Cette solution est donc insuffisante pour les maquettes dont les fréquences utiles sont supérieures à 50 kHz. Il est également à noter que cette solution pose le problème du coût (pour rendre hermétique la maquette) et de l'accessibilité de la maquette pendant les mesures.
- **Compenser a posteriori les mesures** (par un traitement sur ordinateur).

### 3.3 - Comportement acoustique matériaux

L'absorption d'un matériau, qui intervient comme facteur de diminution de la réverbération, est fonction de la fréquence de l'onde. La figure 12 montre ainsi l'allure de la variation du coefficient d'absorption, en fonction de la fréquence, des trois types de matériaux acoustiques absorbants utilisés pour la correction acoustique de salles.

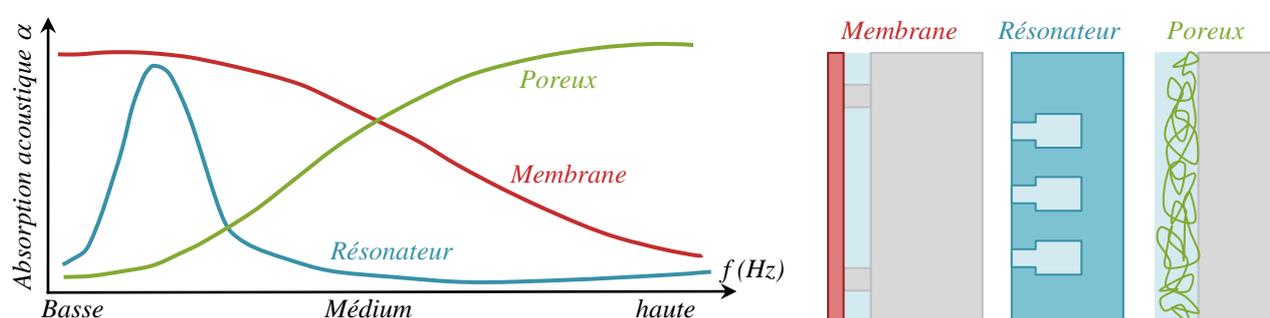


Figure 12 : Comparaison de l'allure du coefficient d'absorption des trois types de matériaux absorbants utilisés en correction acoustique de salles.

On voit une différence de comportement de ces différents types de correcteurs (poreux, résonateurs de Helmholtz<sup>8</sup> ou membrane), ainsi qu'une variation dépendante de la longueur d'onde. Il est à noter que les conditions géométriques pour les matériaux constituant les parois influencent également les coefficients d'absorption de ces matériaux :

- **Matériaux poreux** : augmentation de l'absorption avec l'épaisseur à moyenne fréquence.
- **Résonateurs d'Helmholtz** : diminution de la fréquence d'absorption maximum avec la diminution de la surface d'ouverture du col, l'augmentation du volume et de la longueur de col des cavités du résonateur.
- **Membrane** : augmentation de la fréquence d'absorption maximum avec la diminution de la masse surfacique de la plaque et de l'épaisseur de la lame d'air.

Compte tenu de cette dépendance de l'absorption d'un matériau en fonction de la fréquence, il est nécessaire d'utiliser des matériaux dont les performances à échelle réduite soient équivalentes à celles en situation réelle. Cependant, un excès d'absorption au niveau des couches limites, dû aux effets viscothermiques, proportionnel à la racine carrée de la fréquence, est responsable d'une absorption supplémentaire d'environ 5% à 100 kHz. En conséquence, il est difficile d'obtenir des valeurs correctes du temps de réverbération en hautes fréquences dans les maquettes. Néanmoins, cet effet peut être partiellement compensé en choisissant des matériaux dont l'absorption, dans la maquette à échelle, soit inférieure à celle en situation réelle.

<sup>8</sup> Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1820-1894) scientifique allemand. Le résonateur d'Helmholtz est un dispositif créé dans les années 1850 afin de déterminer la hauteur des différents sons.

### 3.4 - Comportement des systèmes sources et récepteurs

Les différents tests effectués sur maquette utilisent la méthode de la réponse impulsionnelle qui consiste à émettre un son très bref (l'équivalent d'un claquement de main) par le biais d'un haut-parleur dans la maquette. La réponse à cette impulsion est capturée au niveau des micros, puis fait l'objet d'analyses informatiques, notamment pour en déduire le temps de réverbération de la salle, les possibles échos apparaissant... Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'une source émettant une impulsion acoustique et d'un (ou de) récepteur(s) captant l'évolution du niveau sonore au cours du temps.

#### Source sonore

Les caractéristiques de la source sonore sont fondamentales pour la bonne analyse de la salle, notamment :

- Sa répartition temporelle (signaux continus, intermittents, impulsionnels...),
- Sa composition spectrale (bande passante, répartition des fréquences ...),
- Sa puissance ou énergie rayonnée,
- Sa directivité.

Les hautes fréquences mises en jeu requièrent des sources possédant des largeurs de bande acceptables. Des haut-parleurs de petite dimension offrent l'avantage de la répétabilité et de la reproductibilité de pratiquement tout type de signal. Cependant ils présentent une forte directivité et sont d'autant plus encombrants par rapport aux longueurs d'onde, que l'échelle est petite. La meilleure solution consiste à utiliser des étincelles, celles-ci générant des impulsions d'assez courte durée (30 à 40  $\mu$ s), quasi-omnidirectionnelles et d'assez bonne répétabilité. Ceci permet de réaliser des moyennes cohérentes et d'assurer un bon rapport signal sur bruit de mesure.

Néanmoins, les étincelles sont difficilement manipulables, du fait de la présence de haute tension, d'un réglage délicat et d'un spectre fréquentiel non plat contenant peu de basses fréquences. Des mesures en régime permanent (signaux pseudo-aléatoires contenant toutes les fréquences) peuvent donc être réalisées à l'aide de transducteurs à film piézopolymère (PVDF). Même si ces sources ont une réponse en fréquence assez plate et une bonne répétabilité, elles ne descendent pas en dessous de 2 à 3 kHz et ont une directivité (axiale) assez marquée.

#### Récepteur

En réception, la seule solution possible est l'utilisation de microphones à condensateur 1/8<sup>e</sup> de pouce dont la particularité est d'avoir un rendement acceptable à hautes fréquences (jusqu'à environ 160 kHz, soit 8 kHz au 1/20<sup>e</sup>). Cependant trop gros être omnidirectionnels et perturbant le champ sonore, ils nécessitent l'application d'un cône d'homogénéisation pour les rendre un peu moins directionnels. Les différents problèmes posés par les transducteurs (prix, fragilité, directivité...) constituent l'une des principales limites à l'utilisation de maquettes.

Deux types de microphones peuvent être utilisés :

- Les premiers, dits **monauraux**, n'utilisent qu'un micro qui saisit le son dans toutes les directions pour évaluer les caractéristiques physiques de la salle.
- Les seconds, dits **binauraux**, visent à simuler l'écoute du point de vue du spectateur : une poupée dotée de deux micros (un par oreille) est déplacée dans la maquette pour tester l'écoute en différents points de la future salle.

### 3.5 - Conclusion sur l'échelle à adopter

L'étude sur maquette acoustique constitue donc la seule technique de simulation capable de reproduire toute la complexité du phénomène acoustique sans recours à des hypothèses simplificatrices : en caractérisant parfaitement les transducteurs et les surfaces du modèle, les événements acoustiques sont reproduits à une fréquence plus élevée et avec une durée de propagation plus courte, de façon identique aux événements pleine échelle.

Cependant, du fait des limitations imposées par la transposition fréquentielle, l'usage d'une maquette est conditionné par le choix de l'échelle. Un classement en trois groupes peut être proposé :

1/100<sup>e</sup>  
à  
1/50<sup>e</sup>

Utilisation limitée essentiellement à l'étude de la distribution spatio-temporelle des réflexions précoces.

1/50<sup>e</sup>  
à  
1/20<sup>e</sup>

Calcul de la plupart des indices objectifs de caractérisation de la qualité acoustique possible, à l'exception des indices binauraux, pour lesquels il n'existe pas de transducteurs adaptés aux contraintes imposées par l'échelle.

1/20<sup>e</sup>  
à  
1/5<sup>e</sup>

Investissement très élevé en temps et financement pour des possibilités d'applications intéressantes. Auralisation (création d'un environnement acoustique) possible de la maquette permettant d'accéder à une qualification acoustique de la salle. Au delà d'une échelle à 1/10<sup>e</sup>, il devient trop difficile d'envisager des auralisations de bonne qualité ; les raisons principales en sont : l'impossibilité d'enregistrer des réponses binaurales du fait de l'inexistence de transducteurs pour cet effet, une trop forte absorption de propagation même avec de l'air asséché ou de l'azote, à très hautes fréquences, la bande passante de transducteurs les plus performants est insuffisante pour l'auralisation d'extraits musicaux.

## 4 – Exemple de la grande salle de la Philharmonie de Paris



Figure 13 : Vue extérieure de la Philharmonie de Paris, image [6]



Figure 14 : Grande salle de la Philharmonie de Paris, image [7]

La Philharmonie de Paris (figure 13), institution portée par l'État et la Ville de Paris, avec le soutien de la Région Île-de-France, est une construction, dans le parc de la Villette, d'un grand équipement musical centré sur une salle de concert (figure 14) et un pôle éducatif destiné à la sensibilisation de larges publics. Les Ateliers Jean Nouvel ont été choisis comme maître d'œuvre

du projet. L'acoustique de la salle de concert doit répondre aux normes internationales les plus exigeantes.

#### 4.1 - La grande salle de la Philharmonie

Le modèle adopté pour cette salle de concert mixe deux configurations classiques de salles :

- « **En vignobles** » : privilégiant l'intimité, les musiciens étant entourés par les spectateurs.
- « **Boîte à chaussures** » : permettant, par la disposition des spectateurs sur plusieurs balcons, de réduire la largeur de la salle et de multiplier les réflexions acoustiques précoces latérales.

Les caractéristiques de cette salle de concert sont (figure 15):

- Une configuration symphonie avec une scène centrale de 170 m<sup>2</sup>, jauge maximale de 2400 spectateurs, sur scène 120 musiciens et un chœur (figure 15a ou 15b)
- Une configuration musique amplifiée, jazz, musique du monde avec une scène frontale de 190 m<sup>2</sup>, jauge maximale de 2400 spectateurs assis (figure 15c)
- Une configuration public debout avec jauge maximale de 3700 spectateurs (figure 15d)
- Un volume d'air/spectateur de 13 m<sup>3</sup>
- Une hauteur sous plafond de 22 m
- Une surface au sol de 2 200 m<sup>2</sup>
- Un volume acoustique actif de 28500 m<sup>3</sup>,
- Un volume extérieur, obtenu par le décollement des balcons des parois extérieures, qui assure une réponse tardive du son,
- Une distance maximale entre les spectateurs et la scène de 32 m.

La salle de concert agence deux zones de gradins rétractables partiellement ou totalement (zones 1 et 3, figure 15) et une scène modulable (zone 2, figure 18) afin de créer les configurations de salles les plus adaptées à toutes les formes musicales.

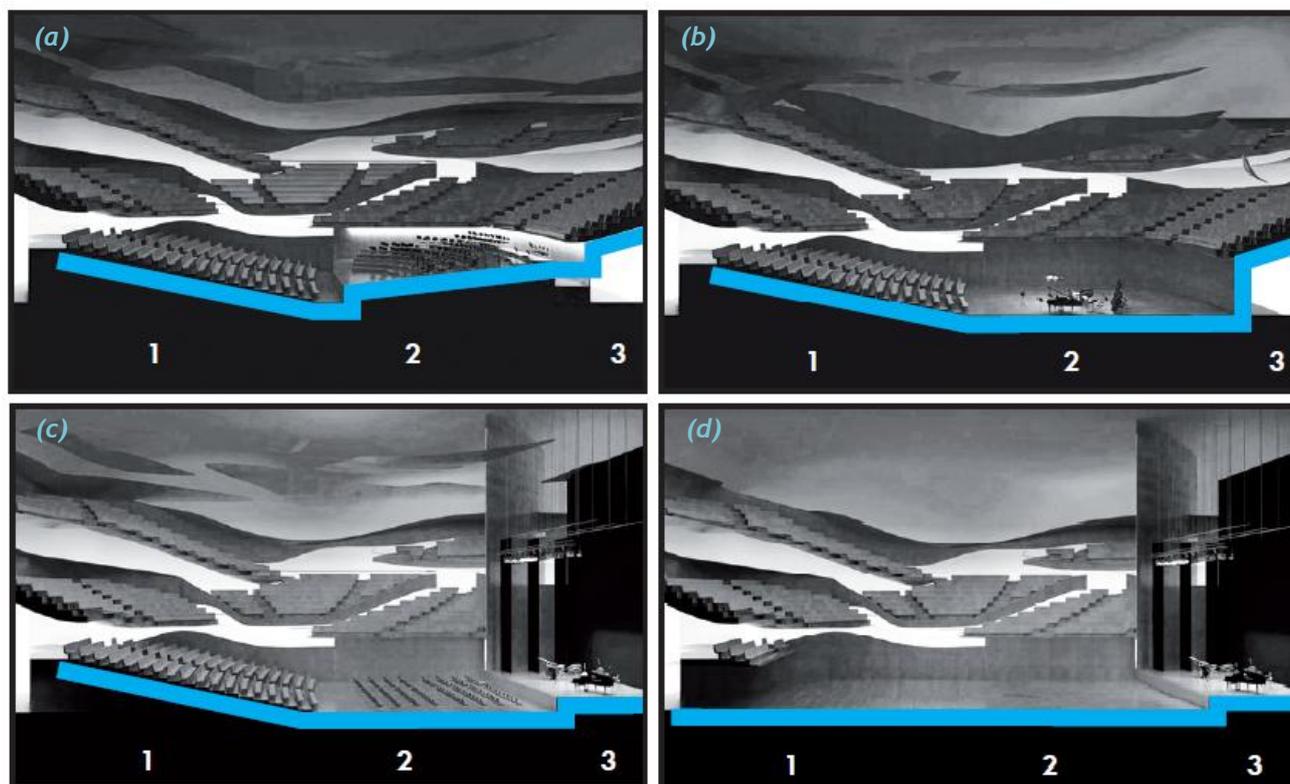


Figure 15 : Les différentes configurations de la salle, modularité des gradins et de la scène [8]

## 4.2 - Isolement acoustique de la grande salle

La grande salle est isolée vis-à-vis de l'extérieur, le critère de bruit de fond est de 15 dBA. L'isolement acoustique prend également en compte les sources sonores du site (points rouges figure 16) comme le bruit routier (proximité du périphérique, de boulevard à grande circulation, mais aussi présence du stationnement in situ), le bruit de l'environnement des salles de spectacles en voisinage immédiat (comme le Zénith) et le bruit du trafic aérien.

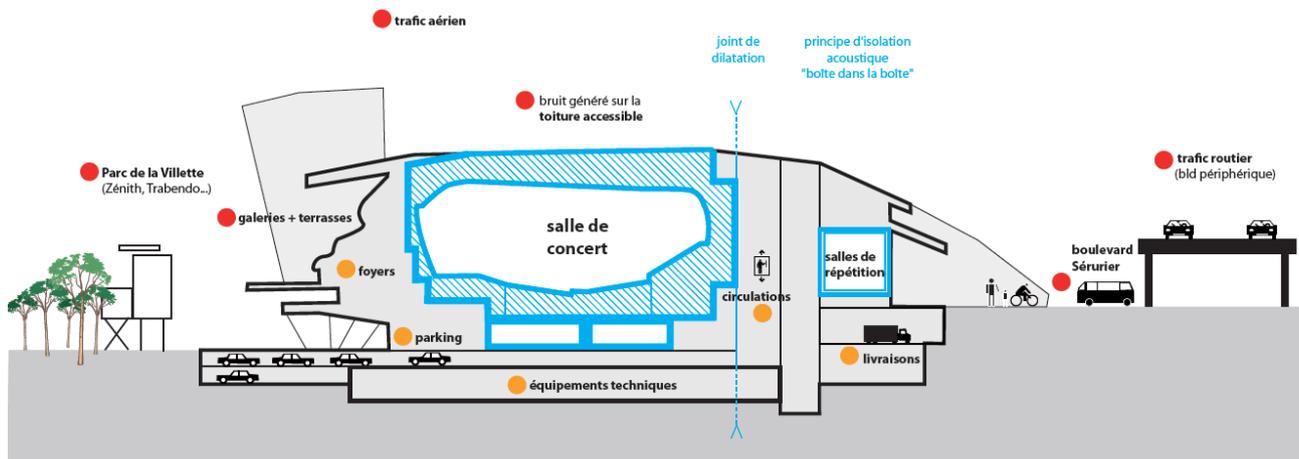


Figure 16 : Isolement acoustique de la grande salle de la Philharmonie [8]

L'agencement des espaces de la Philharmonie ainsi que les besoins d'isolation acoustique font que certains locaux doivent être désolidarisés structurellement d'autres locaux. Tel est le cas de la grande salle de concert et de plusieurs salles de répétition. Cette désolidarisation est obtenue soit par la création d'un système de « boîte dans la boîte » (figures 16 et 17, et enveloppe en trait continu violet figure 19), soit par la création des dalles ou sols secs flottants, soit par la création d'une discontinuité structurelle par l'intermédiaire d'un joint acoustique.

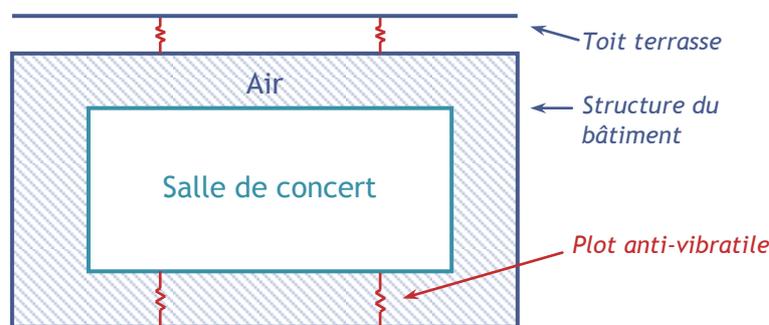


Figure 17 : Schématisation du principe de « boîte dans la boîte »

La conception architecturale du bâtiment même a été l'objet de détails acoustiques particuliers pour lutter contre les transmissions parasites extérieures (jonctions plancher/façades vitrées et cloisons/façades). La toiture accessible au public est montée sur plots anti-vibratiles coupant les transmissions solidiennes (figure 17).

L'isolation entre les différentes zones du bâtiment a également pris en compte : les séparatifs verticaux et horizontaux entre les locaux présentent une parfaite étanchéité à l'air au niveau des raccords murs/cloisons, murs/planchers haut et bas, cloisons/planchers haut et bas, ainsi qu'au niveau des traversées de parois.

## 4.3 - Acoustique de la grande salle

### L'écoute du public et des musiciens :

Pour favoriser l'écoute du public, la géométrie de la salle joue un rôle primordial. La salle de la Philharmonie apparie donc deux grandes formes existantes : la **forme parallélépipédique** « boîte à chaussures » possédant des balcons, adaptée aux orchestres symphoniques mais pas aux grandes dimensions, et la **forme en « vignoble »**, où le public entoure l'orchestre sur des terrasses situées à des niveaux différents. De forme ovoïde, la Philharmonie de Paris reprend donc des caractéristiques des salles en vignoble, et possède de plus de grands balcons (suspendus et projetés vers la scène pour diminuer l'éloignement).

Les nez de balcon et les surfaces situées en dessous produisent des réflexions précoces et latérales ; la clarté des sons est accentuée par des réflecteurs au plafond (zones cernées en bleu figure 19). La canopée (cernée en jaune figure 19), plate-forme située au-dessus de la scène permet le retour du son aux musiciens. Les caractéristiques des parois ou des obstacles présents dans la salle ont une influence sur le temps de réverbération et les types de parois seront donc choisis en fonction du temps de réverbération souhaité de la salle (figure 18).

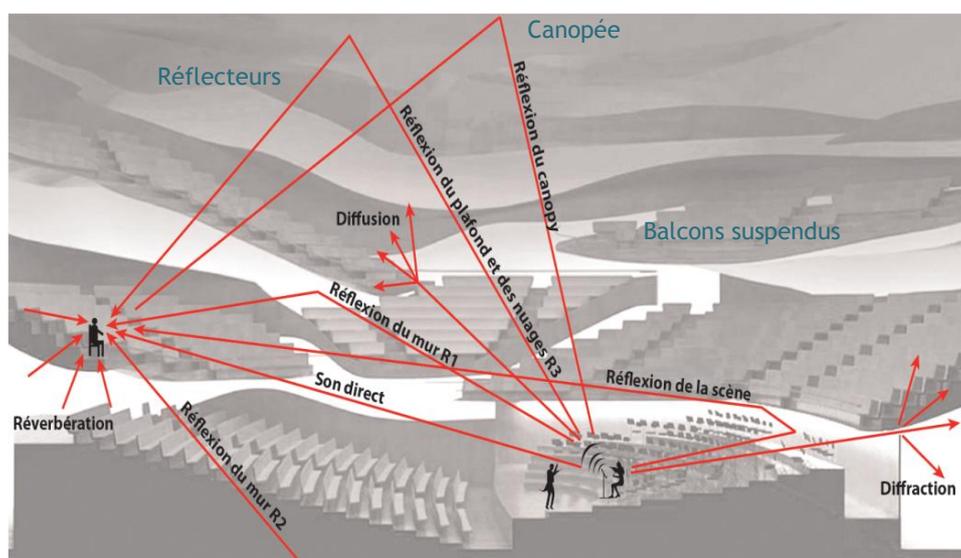


Figure 18 : Schématisation de la propagation du son dans la grande salle de la Philharmonie [8]

La qualité du son est assurée par l'ensemble des surfaces de réflexions qui sont projetées au sein de la coque acoustique. Le dessin des nez de balcons, des murs « rubans » situés derrière le public, ainsi que des réflecteurs situés sous le plafond (zones cernées en bleu figure 19) a été retravaillé tout au long des études afin de créer ces réflexions sonores précoces, de préférence latérales, garantissant, pour l'ensemble des auditeurs, une présence optimale des sources sonores, une grande précision d'écoute et une excellente diffusion du son.

### Réverbération en configuration musique symphonique :

Dans l'exemple de la Philharmonie de Paris, le concept a été de réaliser un espace dédié à l'utilisation symphonique de la salle, mais aussi d'intégrer les modifications nécessaires aux autres configurations. Ainsi, pour la musique symphonique, un espace très réverbérant est nécessaire impliquant l'utilisation de parois peu absorbantes. Les balcons sont décollés des parois, ce qui assure derrière le public un volume supplémentaire (zone hachurée cernée de violet figure 19) où circule le son, favorisant les réflexions tardives et une réverbération ample qui ajoutée à la proximité de l'orchestre crée un sentiment d'intimité et d'immersion sonore.

## Réverbération pour d'autres types d'écoute :

Pour d'autres genres musicaux, une réverbération longue peut entraîner des effets gênants. Il faut alors absorber davantage le son, de manière temporaire, à l'aide de rideaux par exemple : on parle d'acoustique variable. Dans la grande salle, la modularité de la réverbération se fait via les murs de la scène à absorption variable, des rideaux acoustiques absorbants escamotables (ondulations rouges figure 19) et la hauteur de la canopée réglable de 9 à 15 mètres.

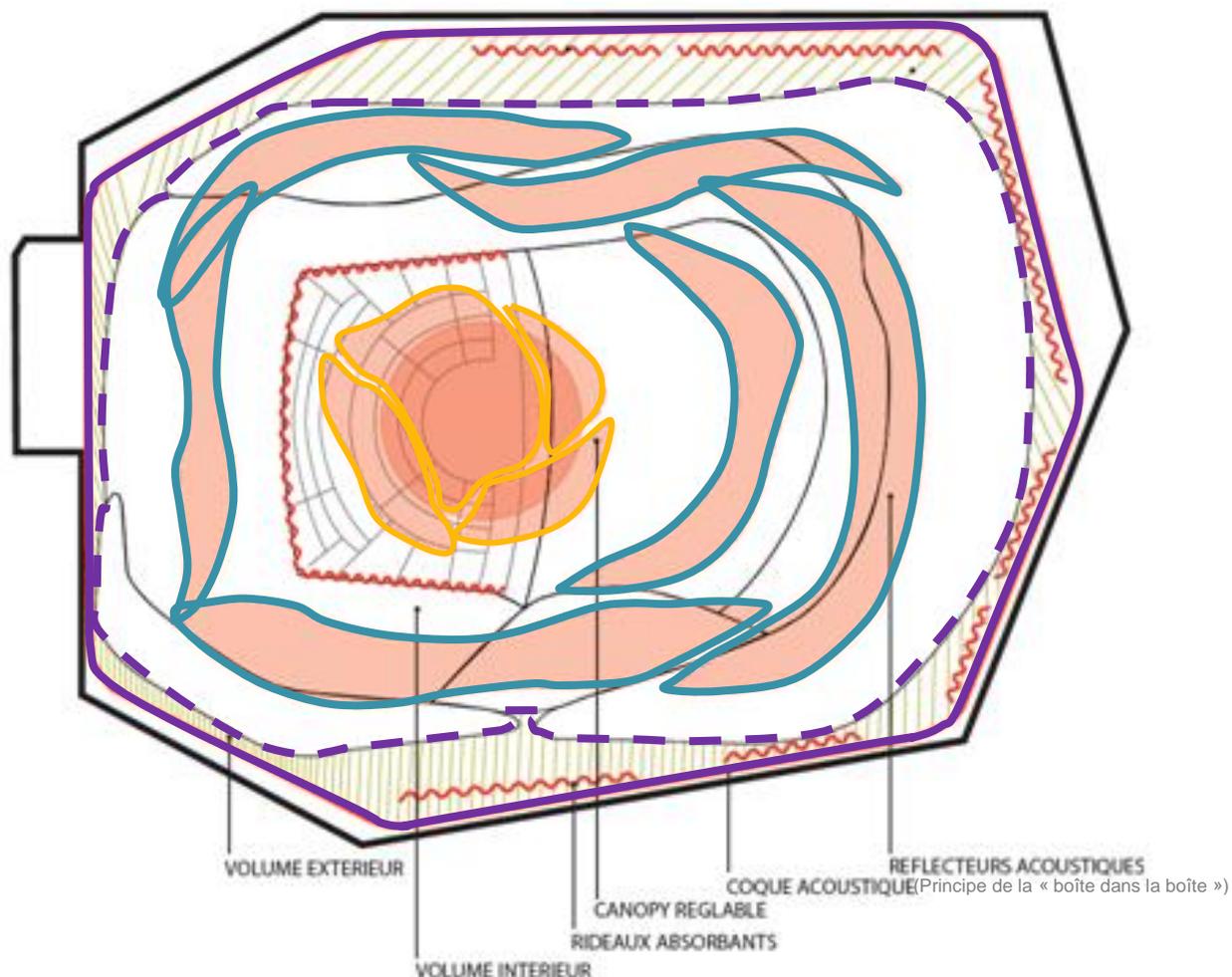


Figure 19 : Acoustique variable de la grande salle de la Philharmonie [8]

On obtient ainsi :

- Une qualité d'écoute pour les musiciens sur scène,
- Une efficacité des réflexions latérales précoces,
- Une homogénéité d'écoute selon le placement dans la salle,
- Une valeur moyenne d'EDT<sup>9</sup> de l'ordre de 2 secondes,
- Un temps de réverbération moyen de l'ordre de 2,3 secondes.

### 4.4 - Maquette acoustique

Les acousticiens de la grande salle de la Philharmonie ont conduit des études acoustiques sur maquettes informatiques et maquettes physiques (figures 20 et 21).

<sup>9</sup> Early Decay Time = valeur liée à la réverbérance perçue

Les premières ont permis le réglage et la vérification des qualités acoustiques de la salle via une modélisation 3D de la salle.

Pour compléter les études réalisées aboutissant aux choix géométriques pour la salle, des mesures et tests acoustiques selon la méthode impulsionnelle (envoi d'impulsion et analyse de la réponse) et selon la méthode optique (vérification géométrique par calculs lasers) ont été réalisés dans une maquette acoustique au 1/10<sup>e</sup> (paragraphe 3.1), étanche et mise sous azote (raisons évoquées au paragraphe 3.2). Ces essais sur maquette ont permis de détecter des effets d'échos que les calculs ne pouvaient pas simuler. Ces effets d'échos ont ensuite été éliminés par des modifications de l'enveloppe, de l'orientation de surfaces de réflexion (murs « ruban » situés derrière le public, gardes corps des balcons, réflecteurs situés sous le plafond) ou l'ajout de reliefs de diffusion sur l'enveloppe en plâtre de la salle.

Sur la maquette, la présence du public est réellement prise en compte aussi bien pour sa capacité d'absorption que pour valider la qualité d'écoute quelques soit le placement du spectateur.



Figure 20 : Maquette au 1/10<sup>e</sup> de la salle de la Philharmonie de Paris testée par des acousticiens, Images [9] et N. Borel

Les essais sur maquette ont également permis de valider les qualités acoustiques de la salle, définies grâce aux simulations informatiques lors des phases précédentes :

- Une qualité d'écoute remarquable pour les musiciens sur scène,
- L'efficacité des « réflexions latérales précoces »,
- Une homogénéité d'écoute selon le placement dans la salle,
- Un temps de réverbération moyen de l'ordre de 2,3 secondes.



Figure 21 : Maquette au 1/10<sup>e</sup> de la salle de la Philharmonie de Paris lors d'un essai [8]

## Références :

- [1]: <http://www.uncubemagazine.com>
- [2]: <http://www.francemusique.fr/actu-musicale/>
- [3]: <https://www.vienna-concert.com>
- [4]: Acoustique du bâtiment, G. Krauss, F. Kuznik, R. Yezou, INSA Lyon
- [5]: [https://www.canal-u.tv/video/cerimes/acoustique\\_des\\_theatres\\_antiques.9038](https://www.canal-u.tv/video/cerimes/acoustique_des_theatres_antiques.9038)
- [6]: <https://fr.wikiarquitectura.com>
- [7]: <http://philharmoniedeparis.fr>
- [8]: <http://philharmoniedeparis.com>
- [9]: <http://www.cstb.fr>