

KahleAcoustics



Philharmonie de Paris

PROGRAMME ACOUSTIQUE

Section sur
la salle de concert
uniquement

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
CHAPITRE 1. TYPOLOGIE DES SALLES DE CONCERT	5
1.1 Boîte à chaussures (« shoe-box concert hall »)	5
1.2 Salles en vignoble ou « vineyard »	9
1.3 Salles à réflexions précoces optimisées (« early reflection design »)	11
1.4 Arena (arène) et amphithéâtre	12
1.5 Salles en éventail	15
1.6 Polyvalence	18
1.7 La jauge de la salle	20
1.7.1 Les salles de moins de 1500 spectateurs	21
1.7.2 Les salles de 1500 à 2000 spectateurs	21
1.7.3 Les salles de plus de 2000 spectateurs	21
CHAPITRE 2. INFLUENCE DE L'ACOUSTIQUE SUR LE CONCEPT ARCHITECTURAL	
DE LA SALLE	23
2.1 Forme de la salle	23
2.2 Volume acoustique de la salle	24
2.3 Surfaces de réflexions – y inclus à l'intérieur du volume de la salle	24
2.4 Diffusion acoustique, énergie latérale et enveloppement sonore	26
2.5 Balance orchestrale, dessin de la scène et entourage de la scène	27
2.6 Variabilité acoustique	28
2.7 Plafond au-dessus de la scène	28
2.8 Possibilités de dessin optimisé pour les réflecteurs, en termes de couverture et de latéralité	29
2.9 Salle côté public	30
2.10 Impact de l'intégration de l'orgue	31
2.10.1 Impact dimensionnel, réservation d'espace	31
2.10.2 Choix de l'emplacement de l'orgue dans la salle	32
2.10.3 Impact acoustique	32
2.11 Critère de bruit de fond	33
2.12 Isolation acoustique	33
2.13 Tableau récapitulatif des critères acoustiques architecturaux	34
2.14 Tableau récapitulatif des critères acoustiques	35

CHAPITRE 3. FACTEURS PERCEPTIFS ET CRITÈRES OBJECTIFS **36**

3.1 Réverbération et réverbérance	36
3.2 Force sonore et puissance acoustique	37
3.3 Energie précoce et présence de la source	38
3.4 Energie tardive et présence de la salle	39
3.5 Energie latérale et enveloppement sonore	39
3.6 Balance spectrale et matériaux de construction	40
3.7 Ecoute entre musiciens	40
3.8 Défauts à éviter	42
3.9 Variabilité acoustique	42

ANNEXE : DÉFINITION DES CRITÈRES ACOUSTIQUES **44**

Durées ou temps de réverbération (TR)	44
Durée de décroissance précoce EDT (Early Decay Time)	44
Bass Ratio et Treble Ratio	44
Clarté C80	45
Force sonore G ou G10	45
Force sonore précoce G80	45
Force sonore tardive G[80 ∞]	45
Fraction d'énergie latérale précoce LF	45
Coefficient de corrélation croisée interaural IACC	46
Critère ST1	46
Coefficients d'absorption	46
Isollements acoustiques standardisés pondérés	46
Indice d'affaiblissement acoustique	47
Tolérances	47
Courbes gabarit des bruits de fond	48

INTRODUCTION

Le projet de la Philharmonie de Paris comprend une grande salle de concert, deux grandes salles de répétition accessibles au public, un ensemble de salles de répétition pour plusieurs formations en résidence, des bureaux, un hall d'accueil et des foyers publics, un pôle pédagogique et d'initiation musicale et une salle d'exposition.

D'un point de vue acoustique, la grande salle de concert, dont la jauge prévue est de 2.400 places, est évidemment l'élément le plus important et le plus critique. Cette salle est majoritairement consacrée à la mise en valeur des répertoires symphoniques et pour cette utilisation une excellente qualité acoustique est essentielle. La grande salle accueillera également – dans de bonnes conditions acoustiques – l'interprétation de récitals, de musique de chambre et d'opéra en version concert ainsi que des expressions musicales sortant du cadre de la musique classique non amplifiée, notamment le jazz, les musiques du monde et la musique contemporaine sonorisée et/ou spatialisée.

L'ambition est de respecter les plus fortes exigences de qualité acoustique, tout en permettant un concept novateur à la fois sur le plan acoustique et architectural. Le maître d'ouvrage exprime très clairement sa volonté de construire une salle enveloppante et flexible, notamment en ce qui concerne l'utilisation et l'emplacement de la scène, avec une grande proximité entre le public et la scène, et une forte intimité entre le public et les interprètes.

Il est évident que la qualité acoustique doit également être soignée pour tous les autres espaces de la Philharmonie, à la fois en ce qui concerne leur acoustique interne et l'isolation acoustique entre locaux et par rapport à l'extérieur.

Le programme acoustique contient les chapitres suivants :

- Une étude sur la typologie des salles de concerts qui consiste à différencier les différents types et formes des grandes salles de concert, à la fois pour fournir une base de réflexion et pour déterminer les – ou des – éléments clés pour le fonctionnement acoustique d'une grande salle de concert ;
- Un chapitre contenant les critères retenus pour la grande salle, à la fois en ce qui concerne les critères architecturaux à respecter pour obtenir la qualité acoustique souhaitée et les critères purement acoustiques. Ce chapitre se clôt avec des tableaux récapitulatifs des critères architecturaux et acoustiques à respecter ;
- Un chapitre sur les facteurs perceptifs et critères objectifs ciblés pour la conception de la grande salle de la Philharmonie de Paris ;
- Un chapitre concernant les autres locaux, notamment les espaces de répétition, les régies et studios d'enregistrement, les foyers publics, les bureaux, etc. Ce chapitre aborde également l'isolation acoustique et l'isolation vibratoire ;
- Des annexes contenant les tableaux détaillés des performances acoustiques attendues par local, et les définitions des critères acoustiques utilisés dans ce programme.

Le succès acoustique du projet dépend en grande partie des choix initiaux, qu'ils soient architecturaux, techniques ou financiers. Ce point reste ouvert au dialogue entre acousticiens de la maîtrise d'œuvre et de la maîtrise d'ouvrage afin d'ajuster si nécessaire les objectifs du programme en fonction des propositions architecturales.

Il dépend aussi du soin apporté dans la conception acoustique – isolation, formes et volumétries, revêtements et finitions, variabilité acoustique – et de la bonne collaboration entre les membres de l'équipe de maîtrise d'œuvre. L'acoustique n'étant pas un lot séparé mais concernant l'ensemble des lots architecturaux et techniques, nous recommandons vivement à tous les membres de l'équipe de maîtrise d'œuvre de lire attentivement la partie acoustique du programme. Nous nous sommes efforcés d'être clairs pour des lecteurs généralistes tout en restant suffisamment précis pour des spécialistes en acoustique.

CHAPITRE 1. TYPOLOGIE DES SALLES DE CONCERT

Afin de fournir une base de réflexion aux concepteurs, et afin d'établir un langage commun, nous proposons dans ce chapitre de discuter et d'analyser différents types et formes des salles de concert.

Il est évident que cette typologie n'est pas exhaustive et que les frontières entre les différents types de salles ne sont pas toujours très bien définies – pour ne citer qu'un exemple, une salle en vignoble peut aussi être inscrite dans une salle en forme de «boîte à chaussures».

Cette description, associée aux deux chapitres suivants, permettra également de comprendre *comment* fonctionnent les différents types de salles d'un point de vue acoustique.

1.1 Boîte à chaussures (« shoe-box concert hall »)

Il est d'abord intéressant de noter que la salle en forme de « boîte à chaussures » – typiquement associée à l'idée d'une salle de concert pour beaucoup de monde – est intimement liée à l'histoire du développement des salles de concerts.

Ce concept de «boîte à chaussures» s'est développé à partir, d'une part, des salles de réception et de bal des cours et de la noblesse et, d'autre part, des églises, notamment protestantes, pour lesquelles l'intelligibilité de la parole était plus importante et dont la qualité acoustique est parfois proche de celles de nos salles de concert actuelles.

Les salles de bal étaient habituellement de forme rectangulaire, souvent très hautes de plafond (à la fois pour la qualité de l'air et pour impressionner les invités). Les matériaux étaient principalement réfléchissants acoustiquement (parquet au sol, plâtre et/ou marbre, quelques fenêtres et éventuellement quelques Gobelins) et l'on y trouvait souvent d'amples ornements. Parfois, ces salles comportaient également une petite galerie ou balustrade. En ce qui concerne leur forme, elles étaient plutôt soit carrées soit allongées, donc déjà de type « boîte à chaussures ». A ceci, il faut ajouter qu'une bonne partie du répertoire de musique ancienne encore joué aujourd'hui a été spécifiquement composée à l'époque pour ces salles et leur acoustique particulière. Pour ne donner que quelques exemples, on citera les symphonies précoces et intermédiaires de Haydn (pour les châteaux du Prince Esterhazy à Vienne et à Eisenstadt), les compositions concertantes de Bach (Weimar et Köthen), ou encore les quatuors et les premières symphonies de Beethoven pour le Palais Rasumofsky.

Les églises protestantes, qui nous intéressent plus particulièrement ici, ont une forme rectangulaire (assez allongée) et une grande hauteur. Elles présentent souvent des galeries ou balcons pour y placer des musiciens, des choristes ou des spectateurs.

Ces églises étaient souvent traitées acoustiquement pour permettre une intelligibilité de la parole malgré leur hauteur. Une partie du répertoire classique a été composée pour ces églises.

On parle ici moins des églises et cathédrales catholiques. En effet, leur volume important et leur acoustique très ample ont été à l'origine d'un répertoire adapté, nécessitant une acoustique plus réverbérante que celle d'une salle de concert typique. Il est intéressant de noter que ces œuvres (musique moyenâgeuse, messes, requiem), ont pendant longtemps été données exclusivement dans des églises et des cathédrales. Ce type d'œuvres s'est entre-temps désacralisé pour rentrer dans la programmation des salles de concert. Les besoins de cette musique – notamment l'extension de la

réverbération au-delà des 2 secondes habituellement demandées – sont donc également à prendre en compte dans le dessin de la Philharmonie de Paris.

Ce qui caractérise la plupart des salles en « boîte à chaussures » – surtout les salles historiques – est l'ampleur de l'acoustique, l'importance de l'effet de salle et le sentiment d'être entouré par le son. Pour les « boîtes à chaussures » de petites dimensions et sans balcon, ce n'est pas étonnant – on peut les comparer à des « salles de bains » agrandies, heureusement souvent pourvues de riches ornements, ce qui permet de casser les effets néfastes des murs lisses parallèles. Le son produit par les instruments, en plus du son direct vers l'auditoire, se propage jusqu'au plafond puis revient vers l'auditoire après un trajet relativement long, donc avec un certain retard. Hormis le son direct, il y a donc peu d'énergie acoustique précoce et de réflexions précoces, tandis que l'énergie tardive et l'impression du champ tardif sont fortes. Ceci fonctionne assez bien pour des salles de petites dimensions ayant une hauteur sous plafond modérée mais ne fonctionne plus pour les grandes boîtes à chaussures : le manque d'énergie précoce se fait alors ressentir et la présence des sources, la définition et l'intelligibilité de la parole deviennent trop faibles (on pense aux grandes églises et cathédrales catholiques, mais également à quelques salles de concert en « boîtes à chaussures » sans balcon).

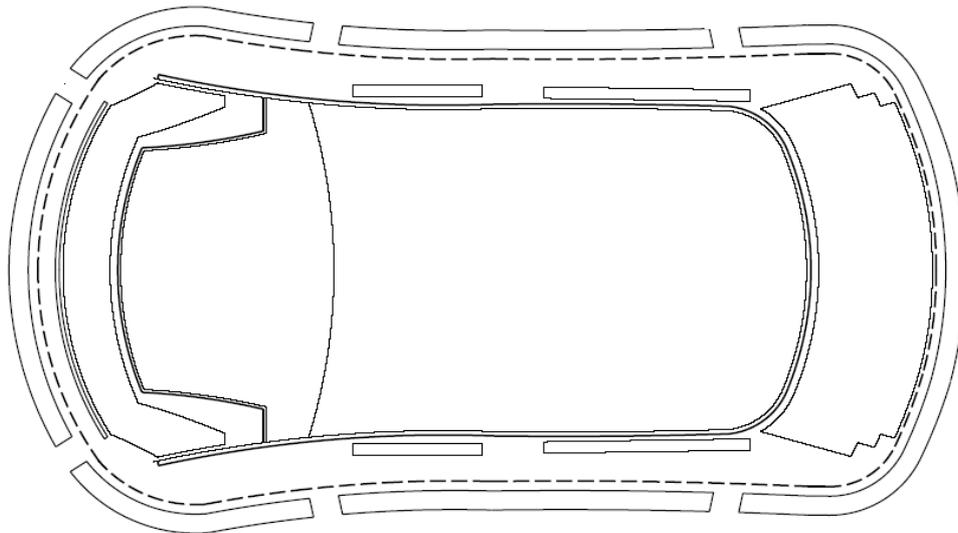
Dans le fonctionnement acoustique des grandes salles en « boîte à chaussures », ce sont les balcons latéraux et surtout leurs sous-faces qui jouent un rôle primordial. Dans la plupart des grandes salles de concert, pour les places au parterre, ce n'est pas le plafond qui crée les réflexions précoces, mais les sous-faces des balcons latéraux et arrières. Au-dessus du balcon le plus haut, il reste en général suffisamment de hauteur de mur sous le plafond pour que la réverbération puisse se développer entre les murs latéraux parallèles. La partie sous ce balcon le plus haut sert principalement à créer des réflexions, ce qui augmente l'énergie précoce, donc la présence des sources, la précision d'écoute et l'intelligibilité.

Par ailleurs, il existe une limite pour la hauteur sous plafond : l'écho qui se situe à environ 17m (aller-retour = 34m, correspondant à 100ms). Une hauteur libre proche de 17m au-dessus d'une scène rend très difficile l'écoute entre musiciens. Pour les salles de plus de 17m de haut, il faut impérativement prévoir des réflecteurs acoustiques ou un plafond continu (type canopy) au-dessus de la scène et du devant du parterre.

Une autre contrainte des « boîtes à chaussures » a déjà été évoquée : des ornements ou autres éléments sont indispensables pour éviter les mauvais effets des murs lisses parallèles, qui créent des colorations et des échos flottants entre ces murs. Au 19^{ème} siècle, les ornements faisaient partie intégrante du langage architectural. L'architecture contemporaine re-traduit ces contraintes par des reliefs ou des sculptures contemporaines, des profils de murs ou de finitions qui coupent le parallélisme, au moins localement.. Ce traitement « contre le parallélisme » ajoute ce que l'on appelle en acoustique de la « diffusion » - une distribution plus large des réflexions - car l'onde sortante est « plus large » que l'onde entrante.

Certaines études concernant la qualité acoustique des salles existantes établissent que le paramètre de diffusion acoustique – ou la capacité moyenne de diffusion des traitements d'une salle – est le critère le plus important pour définir la qualité d'une salle.

Exemple de salle en forme de « boîte à chaussures ».



*Une forme rectangulaire (souvent assez allongée), une grande hauteur, avec généralement des galeries ou balcons, pour y placer des musiciens ou des spectateurs.
Les déformations et reliefs (balcons, colonnes, niches ou autres éléments) sont indispensables pour éviter les mauvais effets des murs lisses parallèles, qui créent des colorations et des échos flottants.*

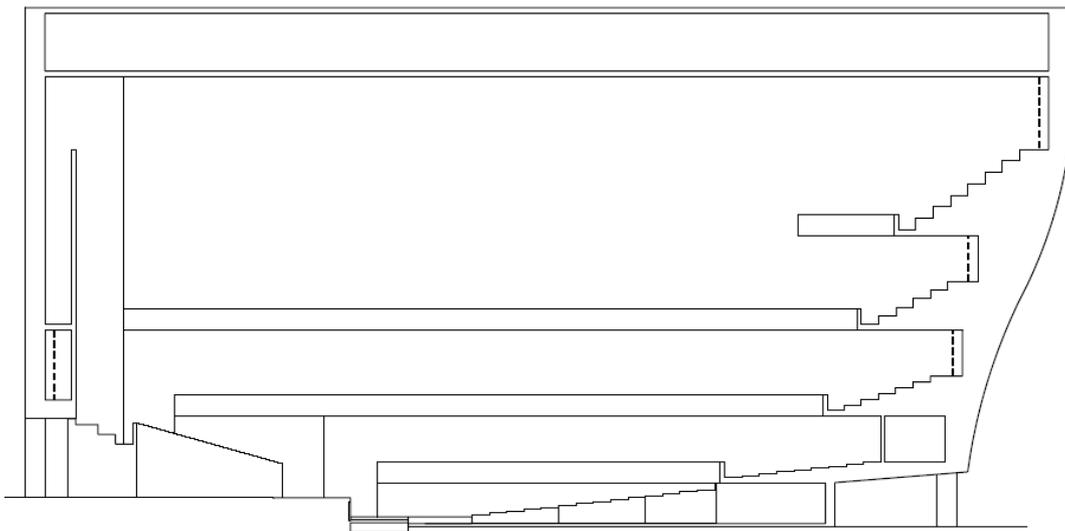
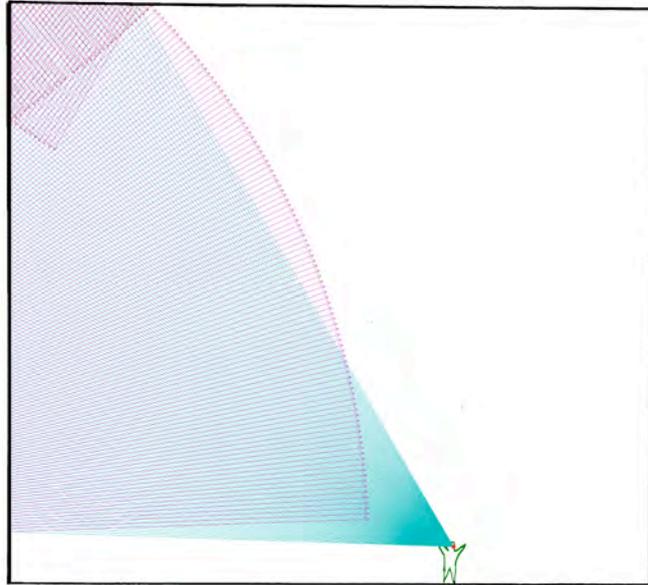
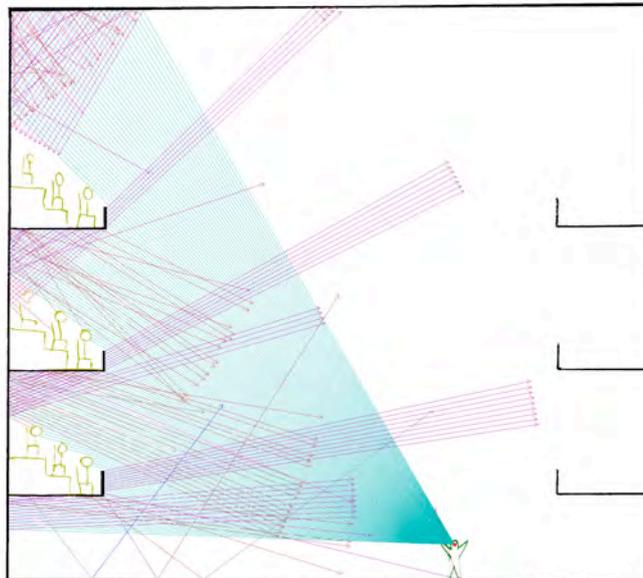


Illustration du rôle acoustique des balcons : simulation du trajet des rayons sonores en deux dimensions. Les traits bleus représentent les rayons incidents, les traits violets et rouges les rayons réfléchis d'ordre 1 et supérieur à 1.



En l'absence de balcons, les rayons sonores sont réfléchis vers le plafond de la salle. Pour une salle de dimensions relativement importantes, ces réflexions arrivent tardivement à l'auditeur. Les réflexions dites précoces, à l'origine d'une part de la clarté du message et d'autre part de la sensation d'enveloppement sonore, sont peu nombreuses.



Pour les places au parterre, les sous faces des balcons créent des réflexions précoces. Au-dessus du balcon le plus haut, il reste en général suffisamment de hauteur de mur sous le plafond pour que la réverbération puisse se développer. La partie sous le balcon le plus haut sert principalement à créer des réflexions, augmentant ainsi l'énergie précoce, donc la présence des sources, la précision et l'intelligibilité.

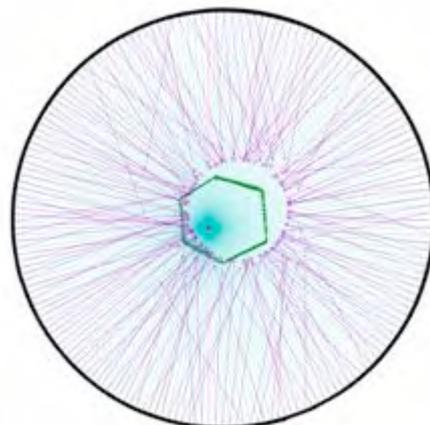
1.2 Salles en vignoble ou « vineyard »

Le modèle type des salles en vignoble est la salle de la Philharmonie de Berlin. Il est intéressant et important de noter que le concept de vignoble a été développé par Lothar Cremer, l'acousticien de cette salle, en réponse aux souhaits de l'architecte Hans Scharoun de placer l'orchestre le plus possible au milieu de la salle et de l'entourer de tous les côtés par des spectateurs. Le projet conceptuel de Hans Scharoun prévoyait une salle ronde, plus ou moins en forme d'amphithéâtre complet, avec le chef d'orchestre placé exactement au centre du cercle, et un plafond en coupole – concept extrêmement dangereux du point de vue acoustique. Le principe majeur du concept de Scharoun et Cremer était de placer l'orchestre « le plus possible » au centre pour créer la salle la plus démocratique possible. Pour respecter des règles fondamentales de l'acoustique, Cremer proposa alors de créer un plafond en forme de « tente » plutôt qu'en coupole et de casser la forme ronde de la salle par des courbes convexes. Il remplaçait donc les courbes concaves, qui focalisent le son, par des courbes convexes, qui diffusent le son, tout en gardant l'idée de l'orchestre au centre entouré par le public.

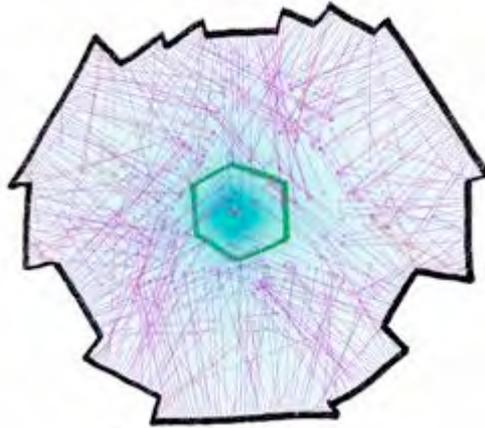
Par ailleurs, le fait de placer le public derrière et sur les côtés de la scène, ainsi que l'absence de balcon ont pour conséquence que la largeur de la salle est nettement plus grande que dans des salles en boîtes à chaussures, et nettement supérieure à ce qui est acceptable acoustiquement sans la présence d'éléments compensateurs. Ce sont ces éléments compensateurs constitués de grands pans de mur – ou « murs partiels » en terrasses décalées –, permettant de réduire la largeur apparente de la salle et d'apporter des réflexions acoustiques, qui ont créé le principe de la salle en vignoble.

Il est très important de réaliser que ce ne sont pas seulement les murs partiels (vignobles) qui assurent la qualité acoustique de ce type de salle. La surface de ces murs est souvent insuffisante pour assurer les réflexions acoustiques nécessaires pour toutes les places du public. D'autres éléments interviennent donc, comme la forme du plafond qui doit être dessinée de manière à permettre une distribution homogène des réflexions dans toute la salle et à assurer un volume acoustique suffisant au-dessus des musiciens. Par ailleurs, la présence de réflecteurs acoustiques au-dessus de la scène, avec un profil étudié, peut permettre de créer suffisamment de réflexions précoces à la fois vers les spectateurs sur l'ensemble des premiers rangs et vers les musiciens, ainsi que les rangs situés derrière l'orchestre.

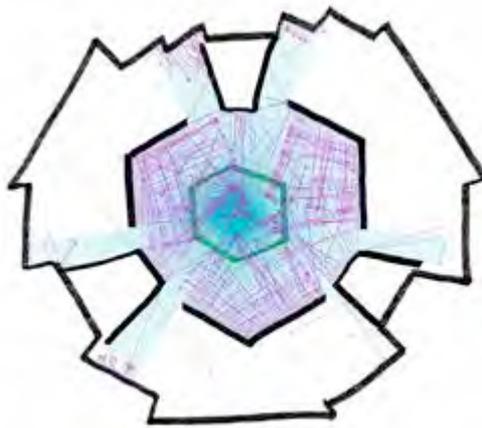
Fonctionnement d'une salle de type « vignoble »: schématisation du trajet des rayons sonores en deux dimensions.



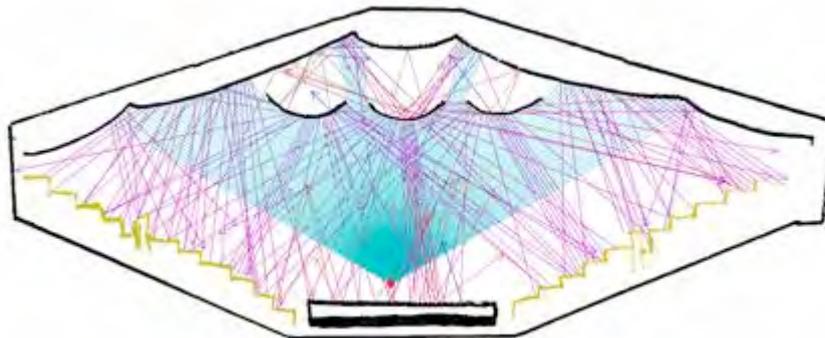
La forme ronde de base est néfaste et crée des zones évidentes de focalisations, en fonction de la position de la source.



Il est nécessaire de casser cette forme ronde pour diversifier davantage les directions des réflexions.



En fonction de la jauge, la forme de base peut induire des distances importantes entre la scène centrale et les murs, d'où un manque d'énergie précoce dans les premières places autour de la scène. L'ajout de pans de murs partiels (sur hauteurs partielles), permet d'ajouter des réflexions précoces dans cette partie de la salle.



La forme du plafond doit être dessinée de manière à permettre une distribution homogène des réflexions précoces dans toute la salle et à assurer un volume acoustique suffisant au-dessus des musiciens.

1.3 Salles à réflexions précoces optimisées (« early reflection design »)

Le terme « salles à réflexions précoces optimisées » n'est pas *a priori* une terminologie bien définie, car il est évident que, dans le dessin de toutes les grandes salles de concert, les réflexions précoces et leur distribution temporelle comme spatiale doivent être optimisées.

On peut placer plus particulièrement deux types de salles dans cette catégorie.

Premièrement, au début de la science de l'acoustique (en parallèle avec le développement des haut-parleurs), on cherchait à optimiser la projection du son des sources vers le public. L'idée était à la fois de renforcer le son des sources par des réflexions précoces dirigées, mais également de s'abstraire (partiellement ou autant que possible) de l'effet de salle. On cherchait une écoute de la source sans (ou sans trop) d'effet néfaste de la salle. Pour l'écoute avec des haut-parleurs, des salles « high fidelity » et « écoute optimisée » ont été construites, notamment aux Etats-Unis, parfois pour une capacité de plusieurs centaines de personnes, avec une acoustique aussi sèche et absente que possible.

Dans cette théorie, les acousticiens n'avaient pas pris en compte (ou ne savaient pas encore) que le sentiment d'espace et d'enveloppement sonore – donc le besoin des auditeurs d'entendre la salle et non seulement les sources sonores – est extrêmement important dans l'appréciation de la qualité d'une acoustique. La plupart des salles « haute-fidélité » ont été détruites ou transformées, par l'ajout de finitions acoustiquement plus réfléchissantes. C'est dans certaines de ces mêmes salles qu'ont eu lieu les premières expérimentations de systèmes technologiques de réverbération artificielle.

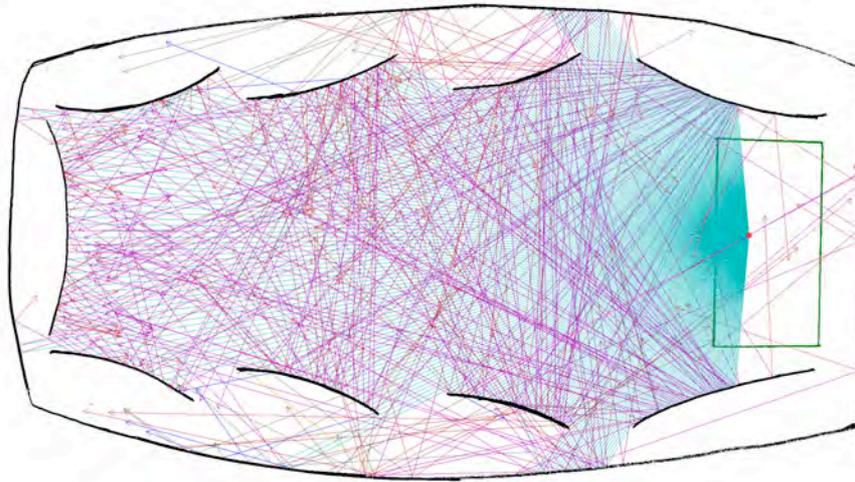
Le besoin auditif et subjectif pour l'auditeur d'une réponse importante et audible de la salle, et plus particulièrement le besoin d'une réponse *latérale*, découvert dans les années 1960, sera décrit plus en détail dans le chapitre sur les facteurs perceptifs et objectifs. L'oreille (et le cerveau) veut à la fois entendre et « suivre » la source (facteur perceptif de la présence de la source), et entendre et « découvrir » la salle, environnement dans lequel nous nous trouvons (facteur perceptif de la présence de la salle). L'arrivée latérale des réflexions précoces comme tardives augmente la différence des signaux sonores aux deux oreilles et contribue ainsi à l'impression d'espace et d'immersion dans l'environnement sonore et la musique.

Deuxièmement, suite aux découvertes sur l'importance de l'effet spatial comme des réflexions latérales, plusieurs salles ont été dessinées, toujours appelées « salles à réflexions précoces optimisées ». Pour assurer une bonne présence des sources dans des salles de taille importante (au-delà de 2000 places), des réflecteurs sont placés dans l'espace et orientés/calculés afin de produire des réflexions utiles pour toutes les places.

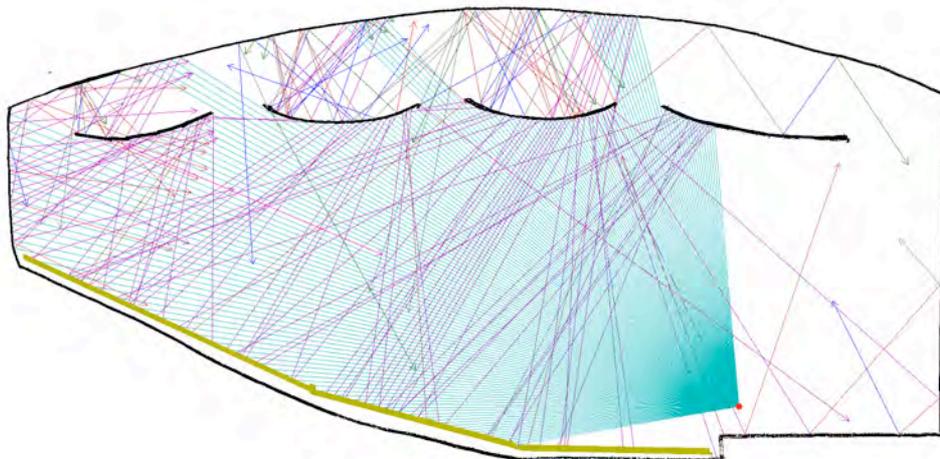
Pour augmenter le sentiment d'enveloppement sonore, les réflecteurs sont orientés de manière à produire des réflexions latérales plutôt que frontales. Par ailleurs, pour augmenter l'homogénéité de la couverture des réflexions et augmenter la diffusion acoustique, les réflecteurs peuvent prendre la forme de diffuseurs acoustiques, suivant le concept des diffuseurs à résidu quadratique (« quadratic residue diffusers » ou « QRDs ») issus des recherches de l'acousticien Manfred Schroeder.

Par contre, l'ensemble des réflecteurs ne constitue pas de séparation entre l'intérieur et l'extérieur de la salle (ils ne sont pas les murs de la salle), mais s'inscrit dans le volume acoustique général de la salle. Les réflecteurs garantissent ainsi une bonne projection depuis les sources sonores vers le public et une bonne présence de ces sources, tandis que le grand volume acoustique de la salle permet un temps de réverbération plus long et une présence suffisante de la salle et du champ tardif ; ce champ tardif risquant sinon d'être masqué par les réflexions précoces.

Schématisation d'une salle « à réflexions précoces optimisées » : simulation du trajet des rayons sonores en deux dimensions.



Les réflecteurs garantissent une bonne projection depuis les sources sonores vers le public et une bonne présence de ces sources, tandis que le grand volume acoustique de la salle permet un temps de réverbération plus long et une présence suffisante de la salle et du champ tardif.



La hauteur sous plafond doit être relativement importante, de manière à garantir un volume acoustique suffisant. Les réflecteurs acoustiques au plafond permettent de créer suffisamment de réflexions précoces pour assurer une bonne clarté et une bonne intelligibilité en tous points de la salle.

1.4 Arena (arène) et amphithéâtre

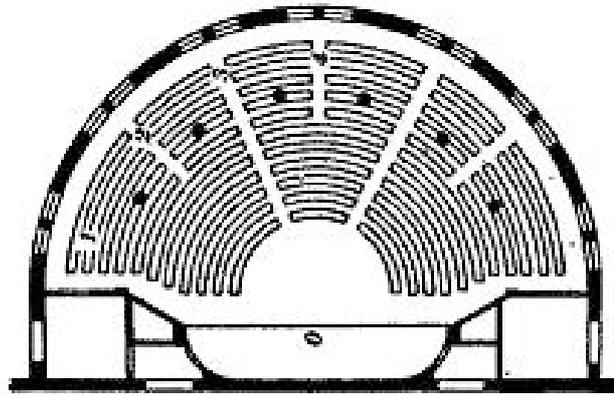
Les salles en arène ou en forme d'amphithéâtre se sont développées à partir des arènes et théâtres antiques. Cette forme fonctionne très bien acoustiquement pour la parole et le théâtre : elle minimise la distance entre les sources sonores et les spectateurs, garantit suffisamment d'énergie pour le son direct (surtout lorsque le profil des rangées suit la courbe logarithmique rehaussant les dernières rangées) et intègre un mur réflecteur derrière la scène (« chœur »). Par contre, cette forme posant des problèmes

acoustiques pour la musique, on recherche alors une réverbération plus longue et un effet de salle important en fermant le volume acoustique.

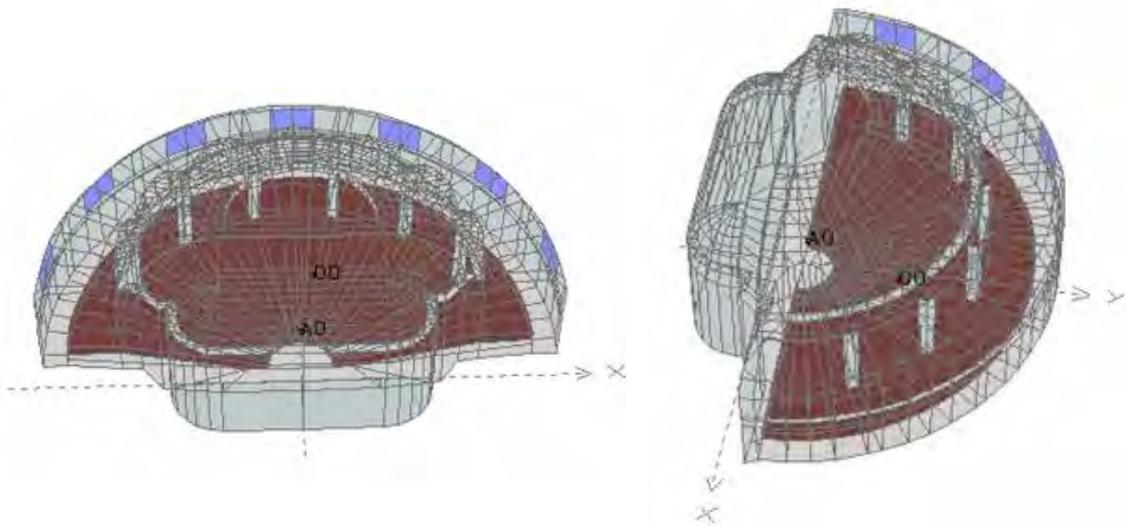
Un cercle – et par extension une sphère – est une géométrie qui ne favorise pas la création d'un champ acoustique uniforme. Pour une source au centre de la sphère, il n'existe que des réflexions le long d'un diamètre du cercle ou de la sphère ; aucune réflexion latérale n'est possible. Un cercle favorise la transmission d'énergie entre une source et un récepteur situés à la même distance par rapport au centre du cercle (on pense par exemple aux galeries de chuchotements), mais ne favorise pas la transmission d'énergie entre une source et un récepteur situés à des distances différentes par rapport au centre du cercle.

Pour faire fonctionner une salle en forme d'arène, il est nécessaire d'introduire des éléments acoustiques (forte diffusion acoustique ou absorption partielle) sur les murs courbes de la salle pour « casser » la forme concave qui entraîne des focalisations, et d'ajouter des surfaces réfléchissantes à l'intérieur du volume pour obtenir une bonne distribution de l'énergie sonore. On peut par exemple imaginer entourer les auditeurs par un large couloir, de manière à ce que le son n'atteigne pas les murs extérieurs de forme concave, donc focalisante. Par ailleurs, des réflecteurs acoustiques couvrant une partie de la scène et une partie du public peuvent permettre d'assurer une meilleure distribution de l'énergie sonore.

En résumé, la difficulté de ce type de salle est d'une part d'éviter les focalisations et d'autre part d'assurer une acoustique homogène en tous points de la salle, car la qualité acoustique reste souvent différente entre les places proches de la scène et les places plus lointaines.

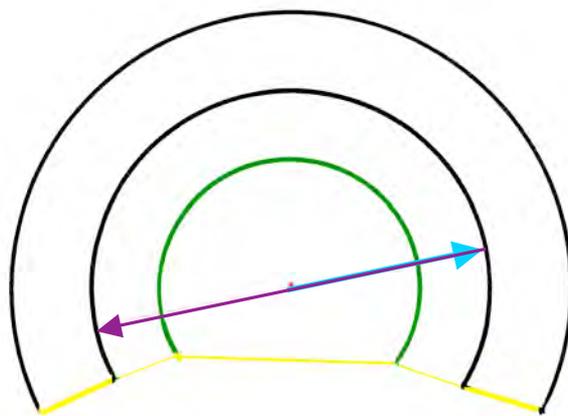


Exemple de salle en forme d'arène.

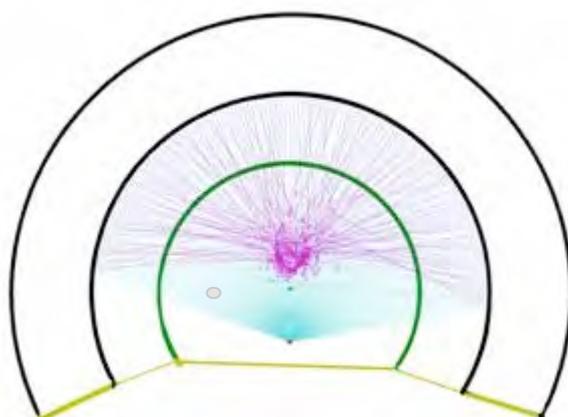


Pour faire fonctionner une salle en forme d'arène, il est nécessaire d'introduire des éléments acoustiques (forte diffusion acoustique ou absorption partielle) sur les murs courbes de la salle pour « casser » la forme concave qui entraîne des focalisations, et d'ajouter des surfaces réfléchissantes à l'intérieur du volume pour obtenir une bonne distribution de l'énergie sonore.

Effet acoustique de la forme en arène : simulation du trajet des rayons sonores en deux dimensions.



Pour une source au centre de la sphère, il n'existe que des réflexions le long d'un diamètre du cercle ou de la sphère – aucune réflexion latérale n'est possible.



Un cercle favorise la transmission d'énergie entre une source et un récepteur situés à la même distance par rapport au centre du cercle.

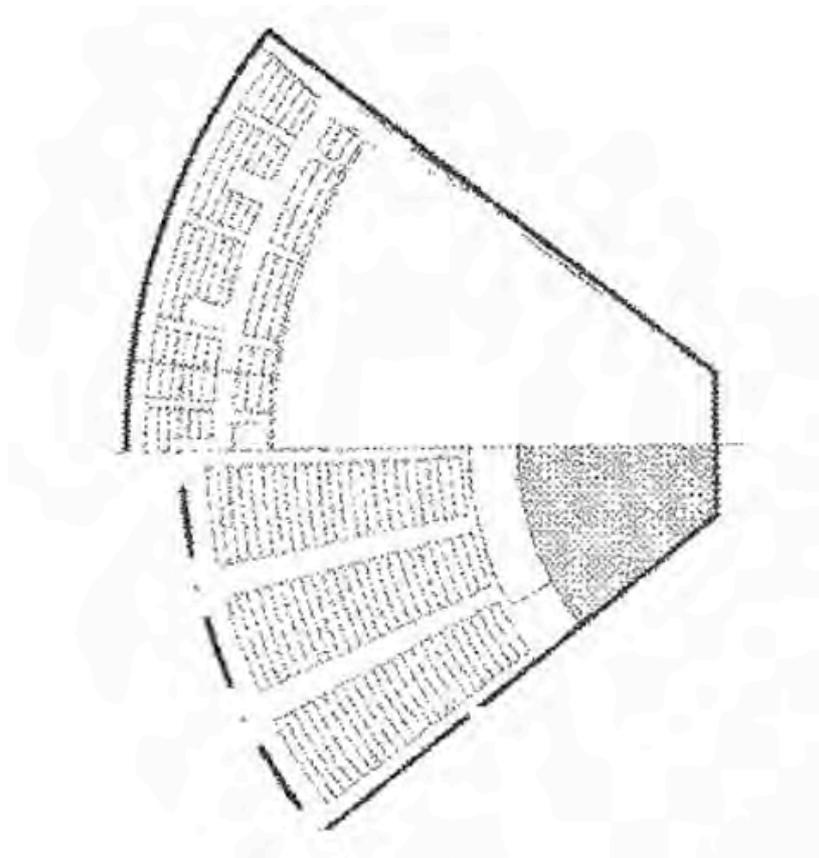
1.5 Salles en éventail

Un type de salle à éviter du point de vue acoustique est la salle « en éventail ». L'avantage de cette forme de salle (parfois également appelée « part de gâteau ») est qu'elle permet de maximiser le nombre de spectateurs pour une distance minimale en fond de salle, tout en conservant un angle de vue acceptable vers la scène. Il n'est donc pas étonnant que les salles en éventail soient souvent des salles polyvalentes, destinées à accueillir à la fois des opéras et des concerts, et souvent construites après la deuxième guerre mondiale, avec un nombre important d'exemples aux Etats-Unis.

A l'époque de la construction de la plupart de ces salles, la notion de variabilité acoustique n'était pas encore très développée (les acousticiens visaient plutôt un « temps de réverbération moyen », compromis entre le temps de réverbération optimal pour les concerts classiques et celui pour l'opéra), et l'importance de l'arrivée latérale des réflexions acoustiques n'avait pas encore été découverte.

Les réflexions des murs latéraux – si elles existent – sont renvoyées vers le fond de la salle, tandis que la partie avant et le milieu du parterre se trouvent dépourvus de réflexions, surtout de réflexions latérales. Le manque de réflexions latérales ne peut qu'être partiellement compensé par des réflexions du plafond (la plupart des salles en éventail ont d'ailleurs un plafond relativement bas et un volume acoustique en conséquence, souvent insuffisant pour le développement d'une bonne réverbération tardive), et cette absence de réflexions latérales induit un enveloppement sonore subjectif faible.

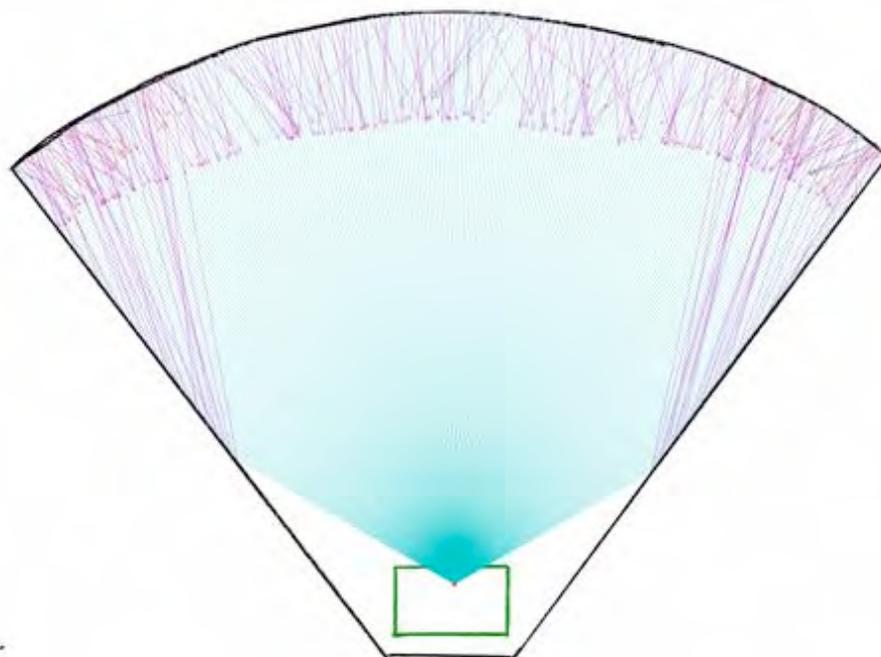
On note que certaines salles plus récentes suivent encore une forme générale en éventail. Leur usage confirme que cette forme est « néfaste » du point de vue acoustique, et qu'elle ne peut donner de bons résultats que si des réflecteurs appropriés sont judicieusement placés à l'intérieur même du volume de la salle pour "casser" la forme en éventail.



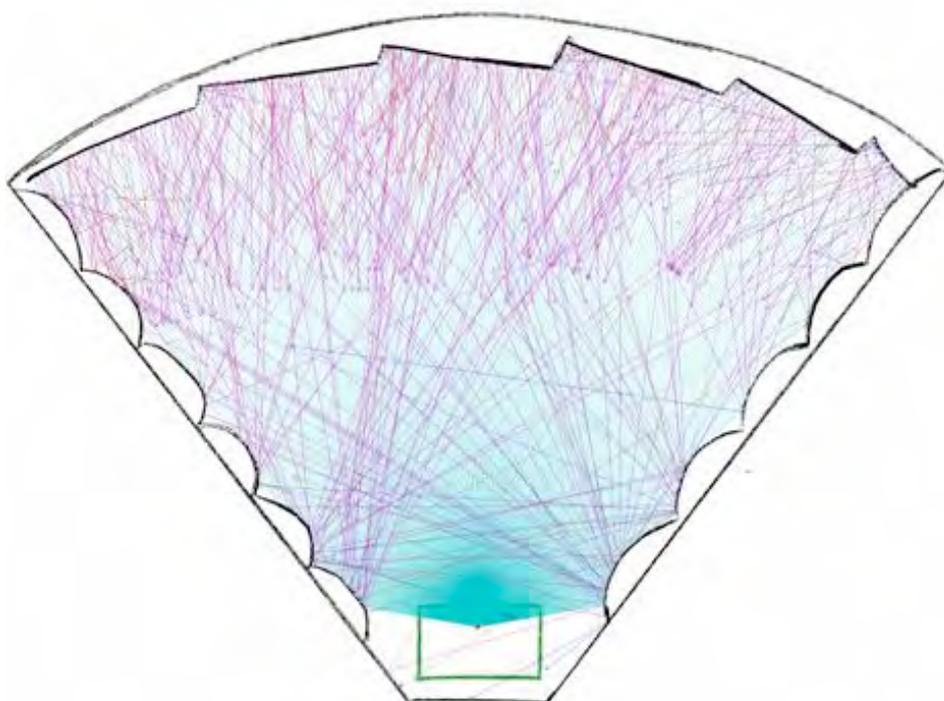
Exemple de salle en éventail

L'avantage de cette forme de salle est qu'elle permet de maximiser le nombre de spectateurs pour une distance maximale donnée, tout en gardant un angle de vue acceptable vers la scène.

Effet acoustique de la forme en éventail : simulation du trajet des rayons sonores en deux dimensions.



L'inconvénient de ce type de forme est que, du point de vue acoustique, toutes les premières réflexions sont dirigées vers le fond de la salle, d'où un manque d'énergie précoce sur toute la partie centrale de la salle.



Le manque de réflexions précoces lié à cette forme de salle peut être partiellement compensé par la présence de réflecteurs acoustiques sur les murs, mais également au plafond.

Il existe un autre type de salle, dérivé de la forme en éventail, appelé d'ailleurs « reverse fan shape hall », c'est-à-dire « éventail à l'envers » : il s'agit plutôt d'une extension ou d'une optimisation de la forme « boîte à chaussures », pour laquelle les murs latéraux ne sont pas parfaitement parallèles mais forment une salle moins large à l'arrière qu'à l'avant. L'avantage d'une salle en éventail inversé est que les réflexions des murs latéraux deviennent plus efficaces dans la partie arrière de la salle. Pour une boîte à chaussures rectangulaire, les réflexions de la partie arrière des murs latéraux n'arrivent plus jusqu'au milieu de la salle. En resserrant les murs vers l'arrière, ces réflexions peuvent être orientées vers les spectateurs situés au milieu de la salle. Les réflexions se trouvent ainsi renforcées dans la partie arrière de la salle et pour l'ensemble des places.

1.6 Polyvalence

Le maître d'ouvrage a fortement exprimé le souhait et la nécessité que ce projet aboutisse à la réalisation d'une salle plus ouverte que ce que proposent les modèles classiques hérités de la fin du 19^e siècle ; la salle doit notamment privilégier une certaine flexibilité entre les zones dévolues aux musiciens et au public.

La notion de polyvalence d'une salle existe évidemment depuis longtemps (on pense aux salles de bal des châteaux dans lesquelles étaient donnés des concerts et qui précèdent les salles de concerts actuelles), mais elle n'a été formulée clairement qu'à partir de la première moitié du 20^e siècle et n'a trouvé de réponses réellement adaptées qu'à partir de la fin du 20^e siècle.

Jusqu'à dans les années 1950, lorsqu'on leur demandait une salle polyvalente (par exemple, pouvant présenter des concerts et des productions d'opéras), les acousticiens optaient pour un compromis entre les exigences acoustiques diverses. Une salle polyvalente était alors « statique » et sans variabilité acoustique, avec un temps de réverbération un peu trop long pour les représentations d'opéras, et trop court (voire beaucoup trop court) pour les concerts de musique classique.

À l'unanimité, les musiciens et le public considéraient leur qualité acoustique comme inacceptable. Les acousticiens, architectes et scénographes durent alors élaborer des concepts permettant de faire varier l'acoustique d'une salle, voire même sa géométrie interne, pour pouvoir l'adapter aux différentes utilisations. On sait aujourd'hui que pour adapter efficacement une salle, il faut :

- Introduire une variabilité dans *l'acoustique* de la salle. Cette variabilité doit permettre d'obtenir plus que le simple changement du temps de réverbération (par l'introduction de rideaux acoustiques ou autres matériaux absorbants, ou par l'ajout de réverbération artificielle par un système électronique). Les critères à adapter incluent le volume acoustique, la force sonore, l'énergie latérale et éventuellement la balance spectrale et/ou orchestrale ;
- Introduire la flexibilité dans *l'architecture* de la salle. Dans certains cas, ces changements peuvent rester mineurs, dans d'autres cas les changements architecturaux doivent être majeurs. La raison très simple en est que chaque type de spectacle a des besoins particuliers, souvent un rapport public/artistes différent. Pour bien faire, il faut également respecter les attentes du public qui varient également en fonction du type de spectacle.

Au cours des dernières décennies, des architectes, scénographes et acousticiens ont proposé toute une panoplie de solutions possibles :

- Rideaux acoustiques, en opération horizontale (souvent sous les balcons latéraux, devant les murs de la salle) ou en opération verticale (souvent descendant du plafond, soit le long des murs de la salle, soit derrière des passerelles lumières, soit au milieu du plafond au-dessus des spectateurs) ;
- Plafond variable en hauteur, pour obtenir une variation du volume acoustique de la salle en fonction du type d'acoustique souhaitée ; parfois en obturant un balcon, parfois en modifiant simplement le volume acoustique pour le même nombre de spectateurs ;
- Variation du volume acoustique par déplacement des éléments de murs ou par fermeture d'une partie du volume de la salle ;
- Variation du volume par ajout de chambres de réverbération. Ces chambres de réverbération ajoutent un volume supplémentaire qui peut être couplé au volume initial de la salle ;
- Variation du couplage acoustique entre le volume de la salle (incluant les musiciens et le public, circonscrits par des réflecteurs acoustiques) et un volume secondaire (situé derrière les réflecteurs acoustiques, souvent non visible) par réglage des réflecteurs acoustiques et/ou de la surface d'ouverture entre les deux volumes ;
- Enlèvement d'une partie des sièges au parterre ou de la totalité de ces sièges pour y installer un sol plat, pour des concerts avec public debout, des expositions ou autres événements nécessitant un sol plat ;
- Agrandissement ou rétrécissement de la scène : soit à l'avant par l'ajout d'un (ou plusieurs) élément d'avant-scène, soit à l'arrière par l'enlèvement d'une partie des sièges des choristes ou du public ;
- Pour les opéras et les théâtres, le mécanisme le plus connu pour les adapter aux concerts de musique symphonique est l'installation d'une conque de concert sur la scène et éventuellement sur l'avant-scène. Par ailleurs, ces projets intègrent souvent un ou plusieurs élévateurs de fosse d'orchestre permettant de placer une grande partie de l'orchestre devant le proscenium.

D'autres solutions poussant la variabilité et la flexibilité plus loin, notamment dans les opéras et les théâtres, ont également été proposées, par exemple :

- Proscenium mobile (dans le cas d'une salle avec une cage de scène) : pour des salles polyvalentes souhaitant une ouverture plus large du proscenium pendant les concerts de musique classique. L'ouverture du proscenium peut aller au-delà de 20 m, donc plus large qu'une scène de concert ;
- Loges mobiles (ou tourelles de loges à plusieurs étages), afin d'accompagner le changement entre un cadre de proscenium avec une ouverture de 12 à 14 m pour un cadre non existant ou un cadre avec une ouverture de 20 m. Dans certains cas, ces tourelles de loges ne sont que pivotantes, dans d'autres on peut les déplacer latéralement, et parfois les deux mouvements sont possibles ;
- Balcons de chœurs mobiles, soit en partie soit en totalité. Lorsque quelques rangs de choristes sont mobiles, on obtient une flexibilité de la taille et de l'emplacement de l'orchestre et une variation de la jauge de la partie choristes/public derrière l'orchestre. Lorsqu'on peut retirer les rangs de choristes dans leur totalité, il est alors possible de placer un fond de scène d'une salle de concert dans une cage de scène habituelle ;

- Tourelles de chœurs mobiles (également pour le public). Elles sont souvent de deux à trois étages, avec escalier interne arrière intégré, sur roulettes ou sur coussins d'air, et sont déplaçables sur scène comme les tourelles des conques de concert.

La plupart des salles pour lesquelles la variabilité acoustique et la flexibilité scénographique/acoustique/architecturale ont été poussées le plus loin sont de forme rectangulaire. Il existe une raison pratique à cela : des déplacements d'objets sont plus simples à imaginer dans un plan simple rectangulaire. En même temps, il est étonnant de noter que les autres formes de salles (« vignobles » et « early reflection design ») n'intègrent souvent pas (ou peu) d'éléments de variabilité acoustique malgré des besoins de flexibilité parfois similaires. Un des buts de la Philharmonie de Paris est d'intégrer des éléments de variabilité acoustique aussi efficaces que ceux d'une « boîte à chaussures », mais dans une forme de salle plus libre.

1.7 La jauge de la salle

Une partie des œuvres habituellement au programme de nos concerts classiques symphoniques a été composée pour des salles de taille et de capacité beaucoup plus réduite que les salles de concert actuelles. Pour ne donner qu'un exemple, il faut se rappeler que la salle de 700 places du « Hanover Square » à Londres, pour laquelle Joseph Haydn écrivit ses dernières symphonies, était à l'époque considérée comme une grande salle de concert. Une autre partie, relativement importante, des œuvres symphoniques habituellement programmées a été composée au 19^e et au début du 20^e siècle, pour des salles de 1.000 à maximum 2.000 places –le confort de l'époque proposait des distances entre rangées de sièges nettement inférieures aux exigences attendues pour la Philharmonie de Paris. Ces salles avaient une surface occupée par le public et un volume acoustique moindre.

En parallèle à l'augmentation de la capacité et de la taille des salles, les instruments de musique ont également évolués, notamment en ce qui concerne leur puissance acoustique. C'est le cas pour la quasi-totalité des instruments : les cordes (développement des cordes métalliques, et réglages différents avec âme renforcée et inclinaison plus forte du manche), les anches, les pianos (du clavecin, en passant par le pianoforte vers le piano à queue, avec un cadre métallique permettant une tension des cordes plus importante) et les cuivres. En termes de puissance acoustique, les avancées parmi les plus importantes ont été obtenues pour les cuivres et les percussions, avec pour conséquence que leur puissance pose parfois des problèmes de balance orchestrale. Dans ce sens, il n'est pas nécessaire de « renforcer » ces instruments avec des réflecteurs acoustiques à proximité ; tout au contraire, le dessin de la salle doit en tenir compte, afin d'éviter une puissance et une projection trop importantes de ces instruments habituellement situés à l'arrière des orchestres (donc plus proches des parois réfléchissantes).

Aujourd'hui, en ce qui concerne le design acoustique, on peut distinguer trois jauges pour des salles de concerts symphoniques :

- Entre inférieur à 1.300 et 1.500 places ;
- Entre 1.500 et 2 000 places ;
- Au-delà de 2 000 places.

1.7.1 Les salles de moins de 1500 spectateurs

Il faut savoir que le niveau sonore des orchestres symphoniques ne dépend pas du nombre des spectateurs. La salle, et surtout son volume acoustique, doit donc plutôt être pensée par rapport au niveau sonore et aux conditions acoustiques de l'orchestre, sans trop tenir compte du nombre des spectateurs. Pour des salles ayant une jauge inférieure à environ 1.500 spectateurs, le volume par spectateur est donc considérable et augmente d'autant plus que la jauge est petite. Une absorption supplémentaire (variable ou fixe) compensera le faible nombre de spectateurs.

Avec un volume acoustique important et une absorption acoustique judicieusement placée, on évite également que la salle ne sature lorsque les effectifs orchestraux sont importants.

1.7.2 Les salles de 1500 à 2000 spectateurs

Pour des salles ayant une jauge entre 1.500 et 1.800 places, et même 2.000 places, le rapport entre la force sonore des orchestres symphoniques et le nombre des spectateurs est parfaitement équilibré. Comme évoqué ci-dessus, la plupart des grandes œuvres symphoniques programmées aujourd'hui (œuvres « romantiques » et « modernes »...) ont été créées pour des salles de cette taille. Dans ces salles, la force sonore des orchestres symphoniques produit alors la puissance acoustique correspondant aux attentes et besoins perceptifs des auditeurs.

Par contre, de multiples critères et éléments sont nécessaires pour assurer une excellente qualité acoustique. Pour n'en citer que quelques-uns, il faut garantir une bonne définition musicale (correspondant à l'intelligibilité des instruments et des phrases musicales et non plus de la parole) pour toutes les places dans toutes les zones d'écoute. Tous les auditeurs ont aujourd'hui l'habitude d'écouter des enregistrements à la radio ou sur CD – enregistrements effectués avec des microphones relativement proches des sources, permettant une excellente définition musicale. Jusqu'à un certain point, l'acoustique d'une salle de concert actuelle doit pouvoir répondre à cette attente. Un bon enveloppement sonore doit être obtenu grâce à des réflexions latérales suffisamment fortes et nombreuses, ainsi qu'un champ tardif omnidirectionnel (diffus) et suffisamment fort. La balance orchestrale et spectrale doit être optimisée, une bonne écoute entre musiciens doit être assurée et, enfin, les échos et les échos flottants audibles entre murs parallèles sont à éviter.

La question devient plus délicate pour la musique de chambre et les récitals, pour lesquels la force sonore des formations musicales n'est a priori plus adaptée ni suffisante pour le nombre des spectateurs. Pour obtenir une excellente acoustique pour ce type de concert, la salle doit fournir davantage de réflexions acoustiques pour simuler une salle de plus petite taille (cf. paragraphe suivant pour plus d'explications).

1.7.3 Les salles de plus de 2000 spectateurs

Les salles ayant une jauge supérieure à 2.000 spectateurs posent un double défi. Il faut, d'une part, maximiser le niveau sonore de la salle – tout simplement parce que l'énergie sonore de l'orchestre symphonique (qui n'est ni vraiment compressible ni expansible) est limitée. Notre oreille et notre perception sont très sensibles à la puissance acoustique, et si celle-ci n'est pas suffisante, l'auditeur « décroche » et n'a plus le sentiment de faire partie du spectacle. D'autre part, l'augmentation du nombre de spectateurs entraînant un agrandissement de la salle, donc un éloignement des surfaces réfléchissantes, ces surfaces deviennent alors moins efficaces car plus éloignées des sources sonores. Plus important encore, le retard des réflexions par rapport au son direct se trouve augmenté par

l'augmentation de la taille de la salle et donc des distances parcourues par le son : si la distance des surfaces réfléchissantes dépasse un certain seuil, l'énergie acoustique de ces réflexions n'est plus intégrée à l'énergie directe par notre oreille. Ces réflexions ne peuvent plus être considérées comme des réflexions précoces, il y a alors un manque d'énergie précoce acoustique. Par ailleurs, la limite d'écho, qui se situe à environ 100ms et correspond à l'aller-retour du son à une paroi localisée à 17 m de distance (soit une différence de parcours entre le son direct et une réflexion d'environ 30 m), il est aisément compréhensible que ce risque d'écho est réel pour une salle de plus de 2.000 spectateurs.

Pour de grandes salles de concerts, il faut alors « subdiviser » la salle, et/ou placer des surfaces réfléchissantes, qui soient plus proches des musiciens et/ou des spectateurs que les murs de la salle.

On peut, par exemple, placer un ou des réflecteurs acoustiques au-dessus des musiciens et des premiers rangs du parterre, où la hauteur libre sous le plafond de la salle est habituellement la plus importante et où les spectateurs se trouvent les plus éloignés des murs de la salle, pour assurer une bonne écoute entre musiciens et ramener des réflexions acoustiques vers les premiers rangs du public. Pour ce ou ces réflecteurs acoustiques, il existe principalement deux options :

- Un grand réflecteur acoustique d'une surface de minimum 200 m² (taille de la scène ou un peu plus), souvent appelé « lentille acoustique » ou « canopy » ;
- Un ensemble de plus petits réflecteurs, ou « nuage de réflecteurs », avec une surface réfléchissante totale de minimum 150 m² couvrant une surface de minimum 250 m².

Pour une salle spécifiquement dédiée aux orchestres symphoniques, avec une programmation bien définie et restreinte, il est possible que ce ou ces réflecteurs soient fixes. En revanche, pour une salle avec une programmation variable, allant des récitals à la musique de chambre et aux orchestres symphoniques, il est impératif que ce ou ces réflecteurs soient variables en hauteur et éventuellement en inclinaison.

Ce ou ces réflecteurs doivent à la fois assurer de bonnes conditions d'écoute entre les musiciens et produire des réflexions précoces efficaces pour les spectateurs situés à proximité de la scène, devant l'orchestre mais aussi sur les côtés et à l'arrière (le dernier cas s'applique également aux orchestres avec chœurs situés derrière l'orchestre). Il s'agit donc à la fois d'une bonne écoute pour les spectateurs et d'une bonne écoute mutuelle entre choristes et musiciens d'orchestre.

CHAPITRE 2. INFLUENCE DE L'ACOUSTIQUE SUR LE CONCEPT ARCHITECTURAL DE LA SALLE

Ce chapitre s'adresse à la fois aux architectes et aux acousticiens. Nous avons choisi de fournir une description des critères acoustiques principaux en termes d'architecture. Nous avons fait en sorte que cette description soit la plus compréhensible possible pour les concepteurs. Le but est de leur fournir une « boîte à outil », afin de fixer les contraintes à l'intérieur desquelles leur créativité peut se développer librement.

Le chapitre s'achève avec des tableaux reprenant les critères acoustiques architecturaux et les critères spécifiquement acoustiques qui sont décrits plus en détail dans le chapitre 3 suivant.

Le but pour la Philharmonie de Paris est de créer une acoustique qui combine une grande clarté sonore, donc une bonne définition et une bonne présence des sources sonores (surtout en vue de la grande capacité d'accueil de la salle) avec une résonance et une réverbération importantes, donc une forte présence du champ tardif de la réponse de la salle. Par ailleurs, il est nécessaire de pouvoir faire varier la résonance et la réverbération de la salle grâce à des éléments d'acoustique variable. Toute la description ci-après vise à obtenir cette double optimisation de la réponse précoce et de la réponse tardive de la salle.

Puis, pour une salle « enveloppante », deux défis acoustiques supplémentaires sont à relever. D'une part – surtout compte tenu du fait que les murs latéraux de la salle se trouveront éloignés –, il faut veiller à ce qu'une quantité suffisante de réflexions, à la fois précoces et tardives, arrivent latéralement aux oreilles des auditeurs afin de créer une bonne impression d'espace et d'enveloppement sonore. D'autre part, compte tenu de la présence des auditeurs non seulement devant la scène, mais également derrière et sur les côtés de la scène, il faut permettre une répartition homogène du son, afin que tous les instruments, y compris ceux dotés d'une directivité importante (donc une direction d'émission privilégiée, par exemple la voix humaine), puissent être entendus de toutes les places dans la salle.

2.1 Forme de la salle

En ce qui concerne le plan de la salle, aucune forme précise n'est préconisée, toute liberté est laissée aux concepteurs.

Cependant, les formes trop problématiques (cf. le chapitre 1 sur la typologie des salles de ce programme), comme un cercle parfait, une ellipse ou une forme en éventail trop prononcée sont à éviter.

Le but de ce programme acoustique et des études qui en ont précédé la rédaction est de donner aux architectes un maximum de liberté en ce qui concerne la forme de la salle, surtout en ce qui concerne la forme en plan, tout en respectant la demande du programme pour une salle enveloppante et la relation public/scène.

Il est également évident que, même si la forme de la salle en plan est « libre », il est impératif de prévoir une réponse acoustique adaptée, en tenant compte de la jauge importante de la salle. Pour ce

faire, il faut prévoir un jeu de réflecteurs acoustiques aux murs ou au plafond qui permettront d'atteindre les objectifs décrits dans ce programme.

2.2 Volume acoustique de la salle

La programmation de la Philharmonie de Paris inclut des œuvres avec orgue, ainsi que des représentations de grandes œuvres avec orchestre symphonique et chœurs. De ce fait, le temps de réverbération maximal recherché pour la grande salle de concert, salle occupée et en présence des musiciens, est supérieur à 2 secondes.

Pour obtenir ce temps de réverbération maximale, il faut prévoir un volume acoustique de la salle égal ou supérieur à 12 m³ par spectateur. Le volume acoustique total de la Philharmonie de Paris se situera entre 28.000 m³ et 32.000 m³.

Il est à noter que des réflecteurs acoustiques seront à inscrire *dans* ce volume acoustique, certainement au-dessus de la scène et éventuellement également ailleurs dans la salle (cf. paragraphes suivants). Dans ce sens, le volume total acoustique aux alentours de 30.000 m³ n'est pas forcément un volume architectural unique.

Il est entièrement acceptable d'un point de vue acoustique de dessiner ce que l'on appelle des « volumes partiellement couplés », c.-à-d. un volume acoustique « intérieur » (qui comprend la scène et ses musiciens et le public) circonscrit par les réflecteurs acoustiques. Derrière les réflecteurs se situeraient alors un ou plusieurs volumes « extérieurs », qui font partie du volume acoustique total de la salle mais ne sont que partiellement visibles par le public. Un de ces volumes « extérieurs » ou « additionnels » peut être le volume acoustique situé par-dessus le ou les réflecteurs au-dessus de la scène. De la même manière, il peut y avoir d'autres volumes derrière d'autres réflecteurs dans la salle. Il n'est pas nécessaire de fermer les volumes acoustiques extérieurs par rapport au volume acoustique intérieur : un réglage, donc une variabilité de l'ouverture, peut être intéressant d'un point de vue acoustique et architectural. Par ailleurs, il est proposé que des moyens de variabilité acoustique (absorption variable) soient localisés à la fois dans le volume intérieur (donc visible par le public et très « visible » pour le son) et dans le ou les volumes extérieurs (donc peu visible par le public).

D'un point de vue acoustique, la variabilité de la programmation musicale suggère donc un couplage des volumes variable – ou du moins une variabilité spatiale – pour pouvoir optimiser et régler la qualité acoustique.

2.3 Surfaces de réflexions – y inclus à l'intérieur du volume de la salle

Un nouveau critère architectural a été spécifiquement développé pour le projet de la Philharmonie de Paris. Ce critère s'attache à relier aussi simplement que possible une forme architecturale choisie à son efficacité acoustique en termes de réflexions précoces : c'est-à-dire, son aptitude à transmettre l'énergie sonore de façon précoce aux spectateurs ou aux musiciens.

Le calcul du paramètre d'efficacité acoustique précoce peut se faire simplement à partir des plans architecturaux. Pour cela, on procédera comme suit :

- On établit dans un premier temps la liste de toutes les surfaces de la salle situées à moins de 15 mètres des sources sonores sur scène et/ou d'une partie de l'audience, et dont l'orientation permet la transmission du son réfléchi de ces sources vers cette partie de l'audience ;
- On complète ensuite cette liste en lui ajoutant toutes les surfaces de la salle situées à moins de 15 mètres des musiciens sur scène et dont l'orientation permet le retour du son réfléchi vers la scène ;
- Pour chacune des surfaces ainsi listées (surfaces dites *efficaces*), on mesure sur plan son aire S [m^2] ;
- Le paramètre d'efficacité acoustique précoce (en m^2) s'obtient finalement par la somme de chacune de ces surfaces S ;
- Le principe de ce paramètre est assez simple : plus la salle présente une quantité importante de surfaces judicieusement orientées proches des sources ou du public, plus son acoustique sera claire et la présence des sources renforcée.

Par ailleurs, les surfaces plus proches des sources sonores reçoivent plus d'énergie sonore. Pour un calcul mathématiquement plus « exact » de ce paramètre, une autre possibilité est de suivre la procédure suivante :

- Pour chacune des surfaces de la liste précédente, on mesurera sur plan à la fois son aire S [m^2] et la distance d [m] du centre de cette surface à une source sonore située au centre de la scène ;
- Pour chacune de ces surfaces efficaces, on calculera alors le facteur $S / (16d^2)$ représentatif (moyennant certaines approximations [notamment $S \ll d^2$]) de la fraction d'énergie sonore produite sur scène que cette surface reçoit et renvoie vers le public ou les musiciens ;
- Chaque fois que ce facteur sera - pour une surface efficace prise individuellement - supérieur à 0,03 (ou 3 %), sa valeur plafonnera à 3 % ;
- Le paramètre d'efficacité acoustique précoce s'obtient finalement par la sommation de chacun de ces facteurs $S / (16d^2)$ pour toutes les surfaces listées.

Ce paramètre, dans ses deux versions, a d'ores et déjà été calculé pour un certain nombre de salles existantes. Ces calculs ont permis de mettre en évidence qu'un critère d'efficacité acoustique précoce supérieur à $1400 m^2$ (dont $500 m^2$ à moins de 15m de la scène) et 24 % est optimal pour des concerts de musique symphonique. Pour une valeur inférieure, les sources paraissent plus distantes, le son perd en clarté et l'attention du spectateur se relâche, tandis que pour une valeur supérieure, le son devient trop direct et la réverbérance et la présence de la salle deviennent insuffisantes. En outre, il faut s'assurer que la scène et toutes les parties de l'auditoire sont couvertes par au moins une ou deux (idéalement davantage) des surfaces efficaces listées.

Lors du calcul du paramètre d'efficacité acoustique précoce, on comptabilisera notamment les surfaces suivantes :

- Les réflecteurs acoustiques éventuellement suspendus ou accrochés dans le volume de la salle et au-dessus de la scène ;
- Les fronts de balcons, lorsqu'ils sont efficaces au sens expliqué ci-dessus ;
- Les murs extérieurs de la salle, dans leur partie efficace au sens expliqué ci-dessus. La partie des murs située directement derrière les spectateurs ne peut être comptabilisée puisque le son provenant des sources est alors absorbé par le public avant d'atteindre le mur ;

- Les sous-faces de balcon, lorsqu'elles permettent une réflexion de l'énergie sonore précoce vers la scène ou le public. Cette réflexion pourra être de premier ordre (retour vers la scène ou le public directement après avoir atteint la surface de la sous face) ou de second ordre (retour vers la scène ou le public après deux réflexions se succédant rapidement : l'une étant la sous face de balcon et l'autre un mur de la salle ou une retombée de poutre située sous ce balcon) ;
- Le plafond de la salle, lorsqu'une zone de l'auditoire est située à moins de 15 m de celui-ci, et uniquement dans sa partie efficace au sens défini précédemment.

2.4 Diffusion acoustique, énergie latérale et enveloppement sonore

Tout d'abord, il faut veiller à créer une diffusion des surfaces réfléchissantes de la salle par du relief, surtout pour les fréquences aiguës à partir de 2 kHz (correspondant à un quart de longueur d'onde d'environ 50 mm – soit une inégalité de surface d'environ 50 mm de profondeur) permettant de multiplier les réflexions acoustiques et de « casser » l'effet miroir de surfaces trop lisses ou trop grandes. Par exemple, on peut créer une diffusion importante par des surfaces convexes qui distribuent les réflexions acoustiques sur une zone plus large que des surfaces planes.

Ensuite, un des défis acoustiques d'une salle enveloppante est la distribution du son vers toutes les zones de la salle, ceci également pour des instruments avec une forte directivité. Par exemple, la voix d'un chanteur a une forte directivité vers l'avant. Il doit néanmoins être possible de l'entendre de manière convenable depuis une place située derrière la scène. Il faut donc créer des réflexions - qui renvoient une partie du son émis vers l'avant - vers les places derrière la scène et vers les places situées sur les côtés. Le dessin des réflecteurs acoustiques doit prendre en compte le besoin de diversité directionnelle des réflexions : les sons émis dans toutes les directions doivent être distribués vers toutes les zones d'écoute de la salle.

En ce qui concerne le facteur perceptif d'enveloppement sonore, des réflexions arrivant latéralement aux oreilles des auditeurs sont nécessaires, ce également dans une salle enveloppante où la notion de « latéralité » dépend de l'orientation des spectateurs. Il faut donc prendre en compte qu'une réflexion peut être latérale pour une place devant ou derrière la scène, mais devenir une réflexion frontale pour une place sur les côtés de la scène.

Deux commentaires sont à ajouter concernant la notion de l'enveloppement sonore. Premièrement, des études scientifiques et comparatives des salles existantes ayant démontré que le facteur perceptif d'enveloppement sonore (et de l'impression d'espace) est très fortement lié à la préférence subjective, une grande attention doit alors être accordée au facteur d'enveloppement sonore et aux critères objectifs corrélés (LF et IACC).

Deuxièmement, il est à noter qu'il est particulièrement difficile d'obtenir une bonne fraction d'énergie latérale dans des salles enveloppantes – le public entourant la scène « éloigne » les murs latéraux de la scène, affaiblissant les réflexions latérales. Même dans la Philharmonie de Berlin – par ailleurs considérée comme une excellente salle– le sentiment d'enveloppement sonore est considéré comme étant légèrement trop faible, surtout pour les places dans l'axe de la salle, donc les places les plus éloignées des murs. Pour le projet de la Philharmonie de Paris, une optimisation de l'enveloppement sonore est attendue de la part des concepteurs.

2.5 Balance orchestrale, dessin de la scène et entourage de la scène

Pour une salle de concert, la scène est un des éléments-clés, à la fois en ce qui concerne la flexibilité et le dessin détaillé, et en ce qui concerne l'environnement acoustique.

Pour créer une bonne cohérence acoustique de l'orchestre et pour créer le meilleur jeu d'ensemble, il ne faut pas que la scène soit trop grande, et surtout pas trop large. Une largeur maximale de 19 m en front de scène est préconisée.

Les murs latéraux de la scène ne doivent pas être parallèles, afin d'éviter des échos flottants et des ondes stationnaires. Pour améliorer la projection acoustique depuis la scène vers la majorité du public situé devant la scène, un rétrécissement de ± 5 degrés vers le lointain est demandé.

Comme indiqué dans le programme architectural, une circulation d'une largeur d'environ 1,50 m est prévue à côté de la scène proprement dite. Cette circulation peut être surplombée par des espaces de spectateurs et/ou des réflecteurs acoustiques. D'une part, cette circulation permet d'éloigner légèrement les murs des musiciens (car ceux-ci n'aiment pas jouer « dans un mur ») et, d'autre part, de placer un réflecteur acoustique proche et en léger surplomb de la scène.

En ce qui concerne la profondeur de la scène, le programme architectural prévoit – pour la première aire scénique – un emplacement fixe du chef d'orchestre. Il n'y a donc pas d'avant-scène amovible, et l'agrandissement de la scène en fonction de la taille de l'effectif orchestral se fait vers le lointain.

Au dessus de la scène – et au dessus du front du parterre ou de l'ensemble du parterre – se situent un ou plusieurs réflecteurs acoustiques, réglables en hauteur entre environ 8m et 16m au-dessus de la scène, et sur une surface étendue (cf. le chapitre 0 sur la nécessité des réflexions précoces depuis la scène vers les auditeurs et le chapitre 0 concernant les besoins d'écoute mutuelle des musiciens sur scène). Ce « plafond acoustique » devant intégrer un nombre important d'éléments techniques et scénographiques sans perte d'efficacité acoustique, il devra être conçu en concertation avec l'architecte, le scénographe et l'acousticien. Pour des concerts classiques, il peut s'avérer utile d'intégrer la lumière de base de la scène (en « douche ») dans le réflecteur ou dans cet ensemble de réflecteurs acoustiques.

Généralement, la scène doit être entourée par des surfaces réfléchissantes à des distances adaptées et de manière à projeter le son depuis la scène vers toutes les zones d'écoutes dans la salle, y inclus les places situées au centre et à proximité de la scène (loin des parois réfléchissantes de la salle), à l'arrière de la scène et sur les côtés, ainsi que sur la scène même (écoute entre musiciens). Les surfaces réfléchissantes à proximité de la scène prennent davantage d'importance dans une salle enveloppante car les murs latéraux se trouvent éloignés et les différentes zones du public sont situées dans des angles très variables par rapport aux sources.

Par ailleurs, les surfaces réfléchissantes doivent être suffisamment massives, pour éviter une absorption trop importante des basses fréquences par effet de plaques résonantes. Pour augmenter la diffusion acoustique des hautes fréquences, surtout les fréquences aiguës, des reliefs sont souhaitables sur quelques surfaces, correspondant à une irrégularité de l'ordre de quelques centimètres.

2.6 Variabilité acoustique

Afin d'atteindre les objectifs de variabilité acoustique explicités plus haut, une quantité importante d'absorption acoustique variable (rideaux lourds amovibles ou autre solution permettant de faire varier la quantité totale d'absorption acoustique) devra être prévue dans le dessin de la salle. La quantité exacte nécessaire dépendra du volume de la salle et du positionnement des éléments absorbants, mais en tout état de cause, un minimum de 1.200 m² de surface d'absorption acoustique variable est requise. Des éléments complémentaires pourront être nécessaires pour équilibrer le spectre dans les basses fréquences, surtout pour les concerts de musique amplifiée.

Ceci inclut notamment des éléments d'absorption acoustique variable autour de la scène, des éléments de variabilité acoustique situés proches des sources et/ou des auditeurs (pour une variabilité de l'énergie sonore précoce), ainsi que des éléments de variabilité acoustique placés relativement loin des sources et des auditeurs, et peu visible par le public (pour une variabilité de l'énergie sonore tardive).

Un concept permettant également une variabilité acoustique par déplacement de certains éléments architecturaux tels que réflecteurs, pans de murs ou autres surfaces réfléchissantes est également souhaité. Cette variabilité architecturale pourra notamment être conçue de façon à permettre une variabilité judicieuse des surfaces de réflexions utiles, permettant ainsi d'adapter acoustiquement (et visuellement) la salle aux différents types de représentations prévues.

En outre, comme précisé dans le chapitre 0 suivant, une variabilité des conditions acoustique sur scène est exigée de manière à répondre aux besoins des différentes tailles de formation et des différents styles musicaux envisagés.

Deux commentaires : premièrement, il est à prendre en considération que certains éléments de variabilité acoustique seront utilisés très fréquemment et donc visibles dans la salle – l'utilisation du temps de réverbération maximale, donc sans aucune absorption, ne correspond pas à l'utilisation la plus fréquente de la salle.

Deuxièmement, en ce qui concerne les spectacles de musique amplifiée, les musiciens demandent habituellement qu'une « cage noire » en velours soit installée derrière eux et sur les côtés de la scène, pour des questions de lumière et d'absorption acoustique pour les retours sur scène.

2.7 Plafond au-dessus de la scène

Le volume acoustique de la Philharmonie de Paris, avec une jauge supérieure à 2.000 spectateurs, doit être considérable pour obtenir une qualité acoustique adaptée et, en conséquence, la hauteur libre sous plafond sera importante. Par ailleurs, avec une forme de salle « enveloppante », il est probable que la hauteur libre sous le plafond sera plus importante au milieu de la salle, c'est-à-dire au-dessus de la scène. Cette hauteur maximale sous plafond sera certainement supérieure à 20m.

Pourtant, une hauteur libre sous plafond de plus de 20 m est trop importante au-dessus de la scène si l'on veut conserver une bonne écoute entre musiciens et renvoyer le son vers le public. De plus, une distance sonore de 20 m est supérieure à la limite d'écho. On peut citer par exemple la Philharmonie de Berlin, où des « nuages » de réflecteurs acoustiques sont nécessaires pour permettre l'écoute des musiciens entre eux.

Si des réflecteurs sont nécessaires aux musiciens, ils le sont également pour le public assis à proximité de la scène.

Par ailleurs, étant donné que la programmation assez large prévue pour la Philharmonie de Paris induit un besoin de variabilité acoustique sur scène, il est impératif que ce réflecteur (ou cet ensemble de réflecteurs) soit réglable en hauteur. En fonction du programme et de la formation orchestrale, la hauteur au-dessus de la scène pour un grand réflecteur sera habituellement entre 10 et 16m, et variera entre 8 et 14m pour un ensemble de réflecteurs. Dans ce programme, il est demandé que les réflecteurs au-dessus de la scène puissent être réglés entre 8m et 16m de hauteur.

Pour des concerts classiques, il est utile d'intégrer la lumière de base de la scène (en « douche ») dans ce réflecteur ou cet ensemble de réflecteurs.

Pour des concerts amplifiés et des utilisations autres que la musique classique, et éventuellement pour des récitals d'orgue, il peut s'avérer utile de pouvoir relever les réflecteurs acoustiques encore plus hauts.

2.8 Possibilités de dessin optimisé pour les réflecteurs, en termes de couverture et de latéralité

Ce programme a déjà amplement évoqué le besoin de réflecteurs acoustiques. Pour que ces réflecteurs soient totalement « visibles » au son, ils doivent être placés plus haut que les musiciens et le public. En ce qui concerne leur forme, de multiples solutions sont envisageables :

- Réflecteurs horizontaux au plafond : de taille variée, plats ou courbes, en une ou deux dimensions, ces réflecteurs sont très « visibles » par le son. Par contre, leur problème est de ne pas créer de réflexions latérales ni de mélange équilibré du son ;
- Réflecteurs verticaux : des murs, mais aussi des fronts des balcons (lorsqu'ils sont orientés judicieusement), ainsi que des pans de murs partiels peuvent créer des réflexions acoustiques efficaces ; ils permettent surtout de créer des réflexions latérales ;
- Réflecteurs diagonaux : pour combiner les avantages de « visibilité » au son et de création de réflexions latérales, des réflecteurs « diagonaux » peuvent être accrochés dans l'espace ;
- Sous-face de balcons : ils constituent un autre type de réflecteur efficace combinant accessibilité au son et création de réflexions latérales. Cette solution est utilisée dans la plupart des salles en boîte à chaussures et peut également être employée dans une forme de salle plus ouverte ;
- Réflecteurs d'ordre 2 généralisés : les sous-faces des balcons fonctionnent acoustiquement par l'action conjointe de la sous-face (plus ou moins horizontale) avec la partie haute du mur (plus ou moins vertical). Il ne s'agit donc pas d'une réflexion simple, mais d'une double réflexion, mathématiquement appelée réflexion d'ordre 2. Il est évident que le principe des réflexions d'ordre 2 peut être généralisé à d'autres formes. Par ailleurs, le principe acoustique d'une sous-face de balcon fonctionne même sans balcon, il n'est pas nécessaire d'y asseoir des spectateurs – suspendre une surface verticale et une surface horizontale dans l'espace créera le même effet acoustique ;



Simulation acoustique d'un réflecteur d'ordre 2 : les rayons noirs représentent l'onde directe vers la surface verticale (pour plus de clarté, nous n'avons pas représenté le chemin de l'onde vers la surface horizontale), les rayons rouges les ondes réfléchies (après deux réflexions). La ligne verte indique la zone au sol couverte par des réflexions.

- Réflecteurs d'ordre 2 optimisés. Il est possible de changer à la fois la courbure de la surface plus ou moins horizontale et/ou celle de la surface plus ou moins verticale, et l'angle entre les deux surfaces. De multiples possibilités apparaissent alors : on peut adapter la direction des réflexions ainsi que la surface de couverture (créant des réflecteurs focalisant ou diffusant). Le graphique ci-après montre le résultat d'une simulation acoustique sur un réflecteur optimisé pour créer une zone de couverture élargie.



Simulation acoustique d'un réflecteur d'ordre 2 : les rayons noirs représentent l'onde directe orientée vers la surface verticale courbée, les rayons rouges les ondes réfléchies (après deux réflexions). La ligne verte indique la zone au sol couverte par des réflexions.

2.9 Salle côté public

Dans le programme architectural, il est question de pouvoir « éteindre » des zones de la salle non occupées par le public. La solution proposée dans le programme architectural est un simple jeu de lumière, pour garder les zones non occupées dans la pénombre.

D'un point de vue acoustique, on peut réfléchir aux questions suivantes :

- Il serait envisageable d'utiliser les zones non occupées comme zones de résonance et de réverbération, en y installant des sièges peu absorbants. Lorsque le public sera moins nombreux, le temps de réverbération maximal de la salle s'en trouvera augmenté, idéal notamment pour des concerts de musique vocale ou généralement de musique nécessitant un temps de réverbération plus long. Si l'allongement du temps de réverbération n'est pas souhaité,

des éléments d'acoustique variable permettront de faire baisser le temps de réverbération et la résonance de la salle. En revanche, pour les répétitions de musique amplifiée salle vide, il faut assurer qu'une quantité suffisante d'absorption variable est intégrée dans le dessin de la salle ;

- Dans le programme architectural, il est clairement indiqué qu'une fermeture des zones non occupées par des rideaux ou des parois « dures », donc acoustiquement réfléchissantes, n'est pas souhaitée. La programmation de la Philharmonie de Paris n'inclut que très rarement des récitals et des concerts de musique de chambre, et une optimisation acoustique spécifiquement pour ces spectacles n'est pas demandée. En revanche, pour les concerts de musique de chambre et/ou concerts avec un nombre d'auditeurs plus faible, il peut s'avérer intéressant de fermer partiellement le volume visible de la salle avec des réflecteurs acoustiques, afin de créer une plus grande intimité acoustique et visuelle ;
- Il faut aussi prendre en compte qu'une salle enveloppante contient un nombre relativement important de places sur les côtés et derrière l'orchestre. Ces places peuvent être formidables à la fois pour le public (proximité par rapport aux musiciens, sentiment de participation à l'évènement, vue sur le chef d'orchestre, etc.) et pour les musiciens, qui se trouvent entourés par du public. Il est à noter que, idéalement, ces places doivent toujours être occupées, et une attention particulière est à accorder à leur qualité acoustique.
-

2.10 Impact de l'intégration de l'orgue

L'intégration d'un orgue dans une salle de concert a des impacts sur différents domaines:

- Sur la morphologie et l'architecture de la salle ;
- Sur l'acoustique de la salle.

2.10.1 Impact dimensionnel, réservation d'espace

Un orgue de facture traditionnelle est un ouvrage complexe constitué de un à deux milliers de tuyaux, disposés en plusieurs rangs dans la profondeur du buffet et répartis en trois ou quatre plans sonores, dont les plus graves peuvent atteindre 5 à 6 mètres de haut pour un jeu de seize pieds (et bien davantage pour un trente-deux pieds).

C'est aussi un ensemble de transmissions mécaniques de haute précision qui doit permettre, par un système de renvois multiples, de transmettre la pression digitale sur une touche pour l'ouverture simultanée des soupapes de un ou plusieurs tuyaux.

L'ensemble est porté par une charpente complexe en bois, avec renforts possibles en métal.

On comprendra qu'un orgue de plusieurs dizaines de jeux (souvent plus de cinquante jeux pour une salle de ce volume) représente un encombrement important, tant en largeur de façade (jusqu'à 12 mètres, très exceptionnellement jusqu'à 15 mètres), qu'en hauteur (jusqu'à 10 mètres, y compris soubassement et emplacement de l'organiste) et qu'en profondeur (jusqu'à 6 mètres), pour une surface occupée d'environ 40 à 80 m².

À l'intérieur du buffet, les tuyaux ne doivent pas être trop tassés pour bien résonner. Il faut également réserver un emplacement et un accès à la console de l'orgue pour l'organiste, ainsi qu'un passage interne dans l'orgue pour l'accorder et assurer son entretien.

2.10.2 Choix de l'emplacement de l'orgue dans la salle

Contrairement aux églises, une salle de concert est un espace acoustiquement orienté, comprenant une zone d'émission et une zone de réception. Compte tenu de la forme enveloppante proposée pour la Philharmonie de Paris, il semble difficile d'imposer un emplacement défini pour l'orgue. Néanmoins, l'emplacement choisi doit tenir compte des contraintes suivantes:

- Permettre une bonne vue de la totalité de l'orgue, y inclus le haut des tuyaux, pour la plupart des spectateurs ;
- Permettre d'obtenir une bonne cohérence sonore de l'ensemble orgue-orchestre pour les spectateurs comme pour le chef d'orchestre.
- Permettre à la fois une qualité acoustique de l'instrument et un confort de travail de l'organiste. Généralement, les organistes apprécient peu le clavier déporté sur la scène (même s'il est prévu et nécessaire pour le projet).
- Les tuyaux d'orgue des jeux les plus aigus, jeux de positif ou de récit, ont un comportement acoustique très directif, contrairement aux sons graves. Il faut donc un renfort de réflexions sonores en provenance des parois proches de l'orgue pour que ces sons aigus soient bien redistribués dans la salle.
- La hauteur de l'orgue a une incidence importante :
 - o les bouches des tuyaux les plus puissants (les graves) ne doivent pas se trouver à la hauteur des choristes ;
 - o pour l'organiste, il conviendra d'équilibrer les graves par rapport aux aigus par un bon couplage orgue-salle.

L'intégration de l'orgue soulève également la question d'une éventuelle surélévation de la hauteur du plafond, qui doit néanmoins rester compatible avec la nécessité de réflecteurs suffisamment proches de l'orchestre vers les musiciens.

La présence d'un ou de plusieurs réflecteurs acoustiques au-dessus de la scène augmente encore le problème de l'emplacement et de la vue sur l'orgue. Comme on l'a écrit plus haut, l'orgue doit être placé suffisamment bas dans la salle pour être vu dans son intégralité par la majorité des spectateurs. La plainte d'un orgue « visuellement coupé » est récurrente dans les salles qui comprennent de réflecteurs au-dessus de la scène.

2.10.3 Impact acoustique

La durée de réverbération et le volume de la salle devront être ajustés de façon à ce que, même en configuration musique symphonique plus chœurs et en salle pleine, la durée de réverbération reste supérieure à 2 secondes pour les fréquences moyennes.

Par ailleurs, l'orgue fait partie intégrante du traitement acoustique de la salle, dans la mesure où il est un élément à la fois absorbant et diffusant acoustiquement. Cette donnée doit donc également être prise en compte lors du choix de son emplacement.

2.11 Critère de bruit de fond

La qualité du silence, donc l'absence de tout bruit de fond dans la salle pendant les spectacles, fait partie intégrante de la qualité acoustique de la salle.

Le niveau de bruit de fond de la salle doit être extrêmement faible, à la limite du seuil d'audibilité, ce pour les concerts avec public comme pour les enregistrements.

Le critère objectif correspondant est le critère de bruit de fond, exprimé soit en NR (« Noise Rating », selon une courbe de bruit de fond en fonction de la fréquence), soit en dB(A), donc en niveau absolu mesuré avec un filtre A, représentant la sensibilité de l'oreille humaine.

Le critère de bruit de fond pour la grande salle de la Philharmonie de Paris est de NR10 et 15dBA pour les concerts de musique classique et les enregistrements.

2.12 Isolation acoustique

Afin d'obtenir le silence quasi absolu dans la salle, l'isolation acoustique de la salle à la fois par rapport à l'extérieur et par rapport aux autres locaux potentiellement bruyant du bâtiment doit être excellente, et en rapport avec le niveau de bruit de fond de NR10 et 15dBA.

En ce qui concerne l'isolation par rapport aux bruits aériens (à l'extérieur du bâtiment comme depuis d'autres locaux bruyants de la Philharmonie), il sera probablement nécessaire d'entourer la grande salle de concert avec une double peau – c.-à-d. que deux parois massives se trouvent toujours interposées entre l'intérieur de la grande salle et l'extérieur ou les autres locaux bruyants.

En ce qui concerne l'isolation vibratoire, notamment par rapport aux salles de répétition et locaux techniques, une isolation structurelle par joints acoustiques ou autres méthodes de désolidarisation structurelle et acoustique est suggérée. Comme indiqué ci-dessus, en tout état de cause, le concept d'isolation acoustique devra être basé sur le critère de niveau de bruit de fond requis. Pour l'isolation vibratoire vis à vis des sources extérieures voir étude vibratoire jointe au dossier de consultation¹.

¹ Cette étude semble montrer que, en fonction de la profondeur des fondations, la désolidarisation verticale sera probablement prépondérante à une désolidarisation horizontale (boîtes à ressort).

2.13 Tableau récapitulatif des critères acoustiques architecturaux

Sommaire des chiffres par rapport au volume de la salle, surfaces de réflexions, surfaces de réflexions au-dessus de la scène, hauteurs minimum et maximum, etc.

Volume par spectateur	Souhaité : entre 12 m ³ et 13 m ³ par auditeur. Acceptable : entre 11 m_ et 14 m_ par auditeur
Volume acoustique total	Environ 30.000 m ³ (entre 28.000 et 32.000 m ³), pour obtenir les 12 à 13 m ³ par auditeur, pour 2.400 auditeurs
Surface de réflexions	1.400 m ² dont 500 m ² proche des musiciens (moins de 15 m d'un point de la scène)
Hauteur de la salle	Libre : la hauteur sera déterminée par le concepteur pour obtenir le volume acoustique requis d'environ 30.000 m ³ ; le plafond de la salle ne sera pas nécessairement plat, et il est attendu et acceptable acoustiquement que la hauteur totale (hors réflecteurs acoustiques) au-dessus de la scène soit supérieure à 20 m.
Hauteur des réflecteurs au-dessus de la scène	Variabilité requise : entre 10 et 16 m pour un grand réflecteur continu, entre 8 et 14 m pour un ensemble de réflecteurs.
Absorption acoustique variable (rideaux amovibles et/ou autres éléments)	> 1.200 m ² de matériau absorbant pouvant être exposés au son ou rangés par un procédé motorisé ou mécanisé.

2.14 Tableau récapitulatif des critères acoustiques

Sommaire des chiffres par rapport au TR, force sonore, force sonore précoce et tardive, C80, LF, IACC, ST1, etc. Ces critères seront explicités plus en détail dans le chapitre 3 suivant.

TR	<p>Moyenne entre 2,2 s et 2,3 s lorsque l'absorption acoustique variable est totalement « cachée », <i>scène et salle occupée</i></p> <p>Moyenne entre 1,4 s et 1,6 s lorsque l'absorption acoustique variable est totalement visible au son, <i>salle vide</i></p> <p>Moyenne entre 1,2 s et 1,4 s lorsque l'absorption acoustique variable est totalement visible au son, <i>salle occupée</i></p>
G, salle vide	<p>Moyenne entre 3 et 6 dB.</p> <p>Écart en fonction de l'emplacement de la source et des récepteurs (delta G) : ± 3dB</p> <p>Variabilité acoustique (de la moyenne de G par l'acoustique variable) requise : > 2 dB</p>
G80, salle vide	<p>Moyenne entre -2 et +2 dB.</p> <p>Variabilité acoustique requise : > 3 dB</p>
G[80ms, ∞], salle vide	<p>Moyenne entre 0 et 4 dB.</p> <p>Variabilité acoustique requise : $> 1,5$ dB</p>
C80, salle vide	<p>Moyenne entre -3 dB et 0 dB</p> <p>Variabilité acoustique requise : > 2 dB</p>
LF, salle vide	<p>Moyenne $> 0,16$</p> <p>$> 0,15$ pour au moins 80% des places</p>
1-IACC, salle vide	<p>Moyenne $> 0,55$</p> <p>$> 0,5$ pour au moins 80 % des places</p>
Bass ratio, salle pleine	Entre 1,1 et 1,3
Treble ratio, salle pleine	<p>Entre 0,9 et 1 à 2 kHz</p> <p>Entre 0,75 et 0,85 à 4 kHz</p>
ST1, salle pleine	<p>Variabilité acoustique requise : > 3 dB</p> <p>Possibilité d'atteindre une valeur ≤ -16 dB</p> <p>Possibilité d'atteindre une valeur ≥ -14 dB</p> <p>Variation à travers la scène : $< \pm 2$ dB par rapport à la valeur moyenne</p>
Niveau de bruit de fond	$< NR10$ et 15 dB(A)
Tolérances	Correspondant à un seuil d'audibilité (5% à 10% pour le TR, habituellement 1dB pour les autres critères, 5% pour les critères de LF et 1 – IACC)

CHAPITRE 3. FACTEURS PERCEPTIFS ET CRITERES OBJECTIFS

Le choix du maître d'ouvrage est d'opter pour une salle enveloppante, avec un nombre relativement important de places situées derrière la scène ainsi que sur les côtés. Comme expliqué dans le programme architectural, il est par ailleurs demandé que la localisation de la scène soit, jusqu'à un certain degré, variable : la scène pourra, notamment pour les spectacles de musique du monde ou amplifiée, être repoussée vers le fond de la salle.

Le dessin acoustique pour l'utilisation principale de la salle comme salle de concerts pour des orchestres symphoniques est par contre à optimiser pour l'emplacement central de la scène.

Les objectifs de critères acoustiques demandés ci-après s'entendent pour l'emplacement central de la scène (« première aire scénique pour orchestre symphonique »). Le déplacement de la scène vers le fond (« deuxième aire scénique au lointain ») peut – et doit – être accompagné d'un changement de la qualité acoustique, plus propice aux concerts de musique amplifiée.

Les critères acoustiques listés dans le tableau ci-dessus et décrits ci-après sont également à prendre en compte dans les analyses des résultats des simulations informatiques demandés en phases projet, pour démontrer que le design de la salle s'accorde avec ces critères.

En acoustique des salles, on distingue les « facteurs perceptifs » des « critères objectifs ». Les facteurs perceptifs décrivent notre perception des différents aspects de la qualité acoustique, donc notre impression subjective de la qualité acoustique d'une salle. Les critères objectifs sont des paramètres calculés à partir des mesures objectives de réponses impulsionnelles, et décrivent la réponse acoustique de la salle entre une source et un récepteur. Les critères objectifs ont été définis pour quantifier les différents aspects « subjectifs » de la qualité acoustique d'une salle. Plusieurs études scientifiques ont établi des relations et corrélations entre ces critères, dans le but de créer une correspondance cohérente entre critères objectifs et impressions subjectives. Il est à noter que, a priori, cette « correspondance » peut être appliquée pour différents types de forme de salles, et donc également pour une salle enveloppante conforme à la demande du maître d'ouvrage.

Dans ce chapitre, les différents aspects de la qualité acoustique seront traités l'un après l'autre, discutant à la fois du facteur perceptif et des critères objectifs correspondant.

Les définitions exactes des critères acoustiques utilisés dans ce programme acoustique seront données dans l'annexe 2 de ce programme acoustique.

3.1 Réverbération et réverbérance

Le premier critère objectif habituellement utilisé dans la description de la qualité acoustique d'une salle de concert est le temps de réverbération (souvent nommé par son abréviation « TR »). Le temps de réverbération mesure le temps de traînage du son après extinction de la source, sur une décroissance du niveau sonore de 60dB (voir annexe 2 pour une définition normalisée du temps de réverbération).

Le facteur perceptif lié au critère objectif du temps de réverbération est la notion de « réverbérance ». En fait, on distingue deux types de réverbérances : la réverbérance « continue » et la réverbérance « finale ». La première correspond à la réverbération du son que l'on perçoit pendant la musique, et la seconde à la réverbération du son que l'on perçoit à la fin d'une phrase musicale (accord final). La

réverbérance finale est directement liée au critère objectif de temps de réverbération, alors que la réverbérance continue est davantage liée au critère objectif de décroissance précoce, également appelé « early decay time », et mesuré sur les premiers 10 ou 15 dB de la décroissance (EDT10 et EDT15).

Une des principales raisons pour lesquelles le temps de réverbération est habituellement le premier critère utilisé dans la description de la qualité acoustique d'une salle tient au fait qu'il s'agit du seul critère acoustique qui ne varie pas (ou très peu) en fonction de l'emplacement de la source et du récepteur. Il permet donc de caractériser l'acoustique de la salle, en ce qui concerne la réverbération, par un critère unique.

Le temps de réverbération est directement lié au volume acoustique et à la surface d'absorption de la salle. Etant donné que dans une salle de concert la surface d'absorption est principalement constituée par le public assis sur les sièges, le temps de réverbération est donc directement lié au volume acoustique total ou au volume acoustique par personne.

La programmation de la Philharmonie de Paris inclut un orgue dans la salle, donc des œuvres avec orgue, ainsi que des représentations de grandes œuvres avec orchestre symphonique et chœurs.

De ce fait, le temps de réverbération maximal recherché pour la Philharmonie de Paris (salle occupée, mais sans utilisation de rideaux ou autres moyens d'acoustique variable) est de 2,3 secondes. En tout état de cause, le temps de réverbération maximal de la salle, occupée et en présence des musiciens, doit être supérieur à 2 secondes.

Pour obtenir ce temps de réverbération maximale, il faut prévoir un volume acoustique de la salle entre 12m^3 et 13m^3 par spectateur, soit un volume acoustique total d'environ 30.000m^3 pour la salle.

3.2 Force sonore et puissance acoustique

Le facteur perceptif de puissance acoustique est corrélé au critère acoustique de force sonore G. Ce critère mesure la force sonore (parfois aussi appelée amplification de la salle), par une source sonore calibrée. Il se détermine comme étant le rapport en décibels entre la pression acoustique mesurée à un point donné dans la salle (réponse de la salle) et la pression acoustique d'une source omnidirectionnelle de même puissance acoustique mesurée à une distance de 10 m en champ libre. Le critère de force sonore varie selon l'emplacement de la source sur scène et du récepteur dans la salle.

Pour la Philharmonie de Paris, avec sa capacité d'accueil supérieure à 2.000 personnes, le critère acoustique de la force sonore est très important, ceci pour deux raisons. Premièrement, malgré le nombre de spectateurs, la valeur de la force sonore doit être suffisamment élevée. Deuxièmement, la variabilité de la force sonore en fonction de l'emplacement des sources sur scène et du spectateur dans la salle doit rester modérée.

L'oreille humaine est très sensible à la puissance acoustique, et en dessous d'un certain seuil l'attention diminue et le spectateur n'a plus l'impression de véritablement faire partie du spectacle. Pour une grande salle de concert, il est généralement admis que la force sonore doit être positive (donc supérieur à 0 dB pour les moyennes fréquences), ceci pour toutes les places. On considère généralement que la plage idéale pour la force sonore se situe entre + 2 dB et +8 dB.

Pour la Philharmonie de Paris, une force sonore moyenne (moyenne de plusieurs places représentatives, hormis les places à moins de 5m de la scène) entre +3 dB et +6 dB est demandée.

En ce qui concerne les variations de la force sonore en fonction des différents emplacements dans la salle, hormis pour les places à moins de 5m de la scène, elles doivent rester inférieures à +/- 3 dB par rapport à la moyenne de la salle.

3.3 Energie précoce et présence de la source

Des études récentes en psycho-acoustique ont démontré que la perception de la puissance acoustique est plus complexe que la simple corrélation avec la force sonore ou le critère d'amplification de la salle.

Il s'avère que notre oreille – et notre cerveau – sépare les informations auditives acoustiques en deux flux séparés, un flux étant lié à la perception de la source et un deuxième flux lié à la perception de l'espace. Ceci est logique d'un point de vue cognitif : assis dans une salle, nous cherchons à obtenir d'une part de l'information par rapport à la source (et surtout par rapport au contenu, donc le message sonore ou musical) et, d'autre part, par rapport à l'environnement dans lequel nous nous trouvons. En conséquence, il ne faut pas uniquement optimiser la force sonore d'une salle, mais il faut optimiser indépendamment la réponse précoce (présence de la source) et la réponse tardive (présence de la salle).

La présence de la source est directement liée à l'énergie précoce de la réponse acoustique de la salle. Dans une grande salle de concert, à l'exception des places très proches des sources (à moins de 3 m à 5 m par rapport aux sources), entre 90 % et 99 % de l'énergie acoustique parvient des réflexions acoustiques arrivant des parois de la salle.

Notre système auditif intègre l'énergie des réflexions à l'énergie du son direct si les réflexions parviennent avec un retard de moins d'environ 80ms (le processus perceptif est en réalité encore plus compliqué, mais dans le but du dessin de la Philharmonie de Paris, la limite de l'intégration à 80ms constitue une description suffisante).

Pour assurer une bonne présence auditive des sources, il faut donc créer un nombre important de réflexions (grâce aux réflecteurs ou parois de la salle), qui arrivent avec un décalage temporel inférieur à 80ms, surtout si l'on considère la grande capacité d'accueil de la salle et son important volume acoustique. Un décalage temporel de 80 ms correspond à une différence de trajet du son d'un peu plus de 25 m. Etant donné que le son doit d'abord arriver à la surface de réflexion (parois ou murs) puis parvenir depuis cette surface de réflexion aux oreilles des auditeurs, il faut donc placer des surfaces réfléchissantes à proximité des sources et/ou des auditeurs, à une distance maximale de 10 m à 15 m.

Un dessin efficace des réflecteurs permettant d'obtenir une quantité et une énergie sonore suffisante des réflexions acoustiques dites précoces est un des défis les plus importants dans la conception de la grande salle de la Philharmonie de Paris. Etant donné l'importance de ce critère pour la qualité acoustique finale de la salle, des règles plus spécifiques et la définition d'un nouveau critère d'acoustique architecturale ont été fournies dans le chapitre 0 précédent.

En termes de critères acoustiques, le critère de G80 correspondant à la force sonore précoce est moins universellement utilisé, mais sera néanmoins utilisé ici. G80 est défini comme la force sonore pour les 80 premières millisecondes de la réponse impulsionnelle, comparée à celle obtenue avec un haut-parleur unidirectionnel à une distance de 10m en champ libre. Pour la Philharmonie de Paris, une force sonore précoce moyenne (moyenne de plusieurs places représentatives, hors places à proximité de la scène) entre - 2 dB et + 2 dB est demandée.

En outre, une clarté C80 négative, entre - 3 dB et 0 dB (salle vide) est demandée.

3.4 Energie tardive et présence de la salle

Comme évoqué dans le paragraphe 0 de ce chapitre, la perception de la décroissance finale de la salle est directement liée au critère de temps de réverbération de la salle. La perception de la réverbération pendant des messages musicaux continus nécessite non seulement un temps de réverbération suffisamment long, mais également une énergie sonore suffisante du champ tardif de la salle, à partir de 80 ms après l'arrivée du son direct aux oreilles des auditeurs.

Pour la Philharmonie de Paris, une force sonore tardive moyenne $G[80\text{ms}, \infty]$ (moyenne de plusieurs places représentatives, y inclus places sous d'éventuels balcons) entre 0 dB et + 4 dB est demandée. Par ailleurs, une grande homogénéité de la force sonore tardive à travers l'ensemble de places est demandée ; la déviation par rapport à la moyenne doit rester dans une plage +/- 3 dB par rapport à la moyenne de la salle, y inclus pour des places situées vers l'arrière de la salle et sous d'éventuels balcons.

3.5 Energie latérale et enveloppement sonore

Des études scientifiques et des analyses de salles, notamment à partir des années 1960, ont démontré l'importance de l'effet spatial du champ sonore. En effet, notre système auditif préfère recevoir une partie importante de l'énergie réfléchi latéralement plutôt que dans la direction du son direct ou depuis le haut (le plan médian est donc à éviter dans ce sens). Lorsque des réflexions arrivent latéralement, chacune de nos deux oreilles reçoit un message sonore différent, ce que nous interprétons comme une impression d'enveloppement sonore. La sensation spatiale est ainsi créée et, par conséquent, l'auditeur se sent entouré par le son et participer à l'évènement plutôt que de passivement regarder et écouter depuis l'extérieur.

Dans ce sens, les réflexions latérales (avec un angle de minimum 25 degrés par rapport à la ligne directe entre la source et le récepteur) sont avantageuses par rapport aux réflexions venant du plafond – sauf si les réflexions du plafond arrivent également de manière latérale aux oreilles des auditeurs, par une orientation optimisée des réflecteurs au plafond. Les chapitres 0 et 0 donnent plus d'explications sur les possibilités de créer des réflexions latérales vers les spectateurs, soit par les murs de la salle soit par le plafond.

Pour quantifier objectivement le facteur perceptif de l'enveloppement sonore (également appelé « impression d'espace »), on utilise soit le critère de la fraction d'énergie latérale (LF) soit le critère de corrélation inter-aurale (IACC, Inter Aural Cross Correlation).

Pour la Philharmonie de Paris, une fraction d'énergie latérale moyenne LF (moyenne de plusieurs places représentatives, hormis les places à moins de 5m de la scène) supérieure à 0,15 est demandée pour chacune des trois bandes d'octaves centrées autour de 250Hz, 500Hz et 1000Hz. La moyenne des résultats obtenus sur ces trois bandes d'octaves doit être supérieure à 0,16. Au moins 80 % des places de la salle doivent avoir une LF moyenne supérieure à 0,15. Afin d'éviter des localisations fausses (« images fantômes »), les valeurs de LF doivent être inférieures à 0,30, excluant les zones de public près des murs latéraux.

En ce qui concerne le critère d'IACC, on utilisera le critère 1-IACC, afin qu'une valeur plus forte corresponde à une meilleure qualité. Pour la Philharmonie de Paris, une valeur moyenne du critère 1-IACC[E, mid] supérieure à 0,55 est souhaitée, et une valeur moyenne supérieure à 0,50 est exigée. Le critère 1-IACC[E] doit, en moyenne, rester supérieur à 0,5 pour chacune des trois bandes fréquentielles 500Hz, 1kHz et 2kHz. Au moins 80 % des places de la salle doivent avoir une valeur de 1-IACC[E, mid] supérieure à 0,5.

3.6 Balance spectrale et matériaux de construction

Un excellent rendu de tout le spectre sonore est demandé. Pour une grande salle de concert, une remontée du temps de réverbération dans les basses fréquences par rapport aux fréquences moyennes est souhaitable. En ce qui concerne les hautes fréquences, une légère diminution à la fois du temps de réverbération et du niveau sonore pour les hautes fréquences à partir de 2kHz est demandée, de manière à éviter une réponse aigre et agressive de la salle.

Il faut éviter une absorption trop importante des basses fréquences par effet de plaques résonantes, et les matériaux utilisés pour les surfaces réfléchissantes de la salle doivent être suffisamment massifs. En ce qui concerne les hautes fréquences, en plus de l'absorption naturelle de l'air, il faut ajouter un léger supplément d'absorption dans les hautes fréquences : soit en ajoutant, en quantité très réduite, des matériaux absorbants agissant à partir de 2kHz, soit, de préférence, en introduisant de la diffusion acoustique efficace à partir de 2kHz et qui produit également une légère absorption pour ces fréquences.

En ce qui concerne les critères acoustiques, pour le temps de réverbération et pour l'énergie sonore, on définit les rapports pour les fréquences graves et pour les fréquences aiguës par rapport aux fréquences moyennes.

Pour la Philharmonie de Paris, les valeurs suivantes sont demandées :

- Temps de réverbération en basses fréquences « bass ratio » : entre 1,1 et 1,3 ;
- Energie (force sonore G) dans les basses fréquences par rapport aux fréquences moyennes : supérieure à -2dB ;
- Temps de réverbération en hautes fréquences, « treble ratio » (salle occupée) : TR (2kHz)/TR(500Hz,1kHz) entre 0,9 et 1 ; TR (4kHz)/TR(500Hz,1kHz) entre 0,75 et 0,85.

3.7 Ecoute entre musiciens

Pour une excellente salle de concert, il ne faut pas uniquement que le public entende bien, mais également que les musiciens s'entendent bien – il faut d'excellentes conditions d'écoute sur scène afin que les musiciens puissent donner le meilleur d'eux-mêmes.

On considère deux aspects dans la notion de l'écoute des musiciens : premièrement, chaque musicien doit s'entendre lui-même correctement – suffisamment, mais pas trop non plus afin de ne pas trop masquer le son des autres musiciens par son propre son. Deuxièmement, chaque musicien doit entendre correctement et suffisamment le son produit par les autres musiciens, même éloignés.

La surface occupée par un grand orchestre symphonique avoisine les 200 m², environ 18 m de large et 12 m de profond. La distance entre musiciens peut donc varier entre 1,5 m (le musicien le plus proche) et plus de 10 m. L'acoustique de la salle, et surtout l'acoustique de la scène, doit permettre à chaque musicien d'entendre ses collègues au loin presque aussi bien (et aussi fort) que ses collègues proches. Pour cela, il faut créer des réflexions acoustiques entre les musiciens (surtout entre musiciens à distance) par des chemins de réflexions qui ne sont pas interrompus par la présence d'autres musiciens. Ces réflexions doivent être créées par des surfaces situées au-dessus de la tête des musiciens.

Le critère le plus unanimement utilisé pour définir l'écoute entre musiciens sur scène est le critère de « support » ST1. Le critère ST1 compare l'énergie sonore réfléchie (dans les 100 premières millisecondes) à l'énergie sonore propre de la source (voir annexe 2 pour une définition plus complète du critère ST1).

Dans la littérature acoustique, la valeur optimale généralement acceptée pour le critère de support ST1 est d'environ -15dB à -12dB. Il s'agit ici d'une valeur idéale, également applicable aux salles de répétitions et aux salles symphoniques de plus petites dimensions, qui est souvent difficile à remplir dans les conditions réelles d'une salle de concert de grande taille. On peut, par contre, donner une limite basse des valeurs acceptables : en effet, au Concertgebouw d'Amsterdam, la valeur du ST1 est d'environ -17dB à -18dB. L'écoute sur scène au Concertgebouw est difficile (d'après les musiciens du Concertgebouw et d'autres orchestres), mais reste dans la limite de l'acceptable. Les conditions d'écoute sur la scène du Concertgebouw peuvent donc être considérées comme la limite acceptable, mais une valeur encore plus faible du ST1 n'est plus acceptable pour une bonne écoute entre musiciens.

Il est très important que le critère de support (ST1) soit aussi constant que possible pour toute la scène, et que l'écoute soit aussi homogène que possible sur l'ensemble de la scène. Il faut par ailleurs éviter impérativement d'avoir une augmentation nette de la valeur du ST1 vers l'arrière de la scène, où sont habituellement placés les cuivres et les percussions. Ces instruments ont de forts niveaux sonores (donc des problèmes pour écouter leurs collègues de plus faible niveau sonore), et il faut éviter de les renforcer comme de renforcer le retour acoustique de leur propre instrument vers eux-mêmes. S'il y a des surfaces réfléchissantes proches de ces instruments, il doit être possible de les obturer par des rideaux ou d'autres matériaux acoustiquement absorbants.

Par ailleurs, la valeur idéale du critère ST1 dépend fortement de la taille de la formation orchestrale et du type de répertoire : une très grande formation symphonique (éventuellement avec chœur et/ou orgue) ne nécessite pas une valeur de ST1 trop importante, tandis qu'un orchestre de chambre ou de la musique de chambre profite d'une valeur de ST1 plus importante.

Pour la Philharmonie de Paris, il est demandé qu'il y ait un ou plusieurs réflecteurs acoustiques au-dessus de la scène pour produire des réflexions garantissant une bonne écoute entre musiciens. Par ailleurs, il est demandé que ce – ou ces – réflecteurs soient réglables en hauteur, permettant ainsi d'ajuster efficacement la valeur du critère ST1.

Pour la Philharmonie de Paris, les valeurs suivantes pour la moyenne et la variabilité du critère ST1 sont demandées :

- Moyenne de ST1 (moyenne sur la scène) entre - 17 dB et - 13 dB, avec une variation du critère ST1 (moyenne sur la scène), par réglage des réflecteurs au-dessus de la scène ou autres moyens de variabilité acoustique dans l'entourage de la scène, de minimum 3 dB ;

- Hauteur minimale souhaitée des réflecteurs réglables : 8 m (9 m maximum) ;
- Hauteur maximale souhaitée des réflecteurs réglables : 17 m (15 m minimum) ;
- Possibilité d'atteindre une valeur $< - 16$ dB ;
- Possibilité d'atteindre une valeur $> - 14$ dB ;
- Variabilité maximum de ST1 à travers la scène : valeur moyenne +/- 2 dB.

3.8 Défauts à éviter

Il est évident que des défauts acoustiques perceptibles doivent être évités. On pense ici notamment aux échos, échos flottants et réflexions tardives individuelles audibles.

Par contre, une bonne réflexion du mur de fond de la salle vers la scène est avantageuse acoustiquement (si elle n'est pas perçue comme un écho) car elle permet aux musiciens d'avoir un retour de la salle.

3.9 Variabilité acoustique

Comme nous l'avons évoqué tout au long de ce programme, l'objectif principal pour la salle de concert de la Philharmonie de Paris est d'atteindre une qualité exceptionnelle pour la musique symphonique, dans la configuration scénique centrale. En ce sens, les valeurs des critères acoustiques énoncés plus haut s'appliquent spécifiquement à ce contexte musical et pour cet emplacement de la scène.

Le déplacement de la scène vers le fond (« deuxième aire scénique » à l'arrière) entraînera un changement de la qualité acoustique, idéalement pour une qualité acoustique plus appropriée pour des concerts utilisant des sources sonorisées.

En plus des changements acoustiques entraînés par le déplacement des sources d'une aire scénique à l'autre, et du fait de la programmation élargie de la salle, il est impératif de prévoir une variabilité acoustique importante.

La programmation souhaitée par le maître d'ouvrage pour la Philharmonie de Paris inclut, entre autres, les types de spectacles suivants :

- concerts de musique symphonique classique ;
- concerts d'orchestres symphoniques avec chœur et/ou orgue, pour lesquels une réverbération plus forte (en durée et en niveau) est souhaitable ;
- récitals d'orgue ;
- exceptionnellement, récitals et musique de chambre. La qualité acoustique doit permettre le déroulement des concerts de musique de chambre dans de bonnes conditions, sans exigence d'adaptation parfaite pour la musique de chambre ;
- concerts de musique contemporaine, avec ou sans sonorisation de certaines sources et intégration d'un traitement électro-acoustique ou d'une spatialisation ;

- opéras en version concert ou avec mise en espace, pour lesquels l'intelligibilité des voix chantées est à prendre en compte, ce qui impose une réverbération moins longue et une plus grande présence des sources ;
- concerts de jazz et de musiques du monde, généralement amplifiés, pour lesquels la réverbération et la présence de la salle doivent être fortement diminuées ;
- concerts de musique amplifiée. Le déroulement des concerts de musique amplifiée doit être possible dans des conditions acceptables, sans reproduire la qualité acoustique d'une salle dédiée à ce type de spectacles ;
- spectacles exceptionnels, à la fois en musique classique et en musique amplifiée, pour lesquels nous ne pouvons pas fournir de critère précis – le spectacle s'adaptera à la salle, avec toutes les possibilités de variabilité qu'elle peut offrir.

Le besoin de variabilité acoustique est donc évident, et une possibilité de variation des critères acoustiques suivants est demandée :

- une variabilité du temps de réverbération, entre une limite haute de 2,2 à 2,3 secondes (salle et scène occupées) et une limite basse de 1,2 secondes salle occupée (1,4 secondes salle vide) est souhaitée ;
- une variabilité de la force sonore moyenne de minimum 2 dB ;
- une variabilité de la moyenne de la force sonore précoce de minimum 3 dB ;
- une variabilité de la moyenne de la force sonore tardive de minimum 1,5 dB ;
- une variabilité de la clarté C80 de 2 dB minimum.

Idéalement, un réglage aussi indépendant que possible des quantités d'énergie précoce et tardive est vivement souhaité. Pour obtenir la forte variabilité de l'énergie précoce, des rideaux acoustiques (ou autres éléments permettant de faire varier la quantité totale d'absorption acoustique) doivent être positionnés proches des sources sonores. La variabilité de la réponse tardive et de la clarté C80 nécessite le positionnement d'éléments d'acoustique variable loin des sources, sans couvrir des surfaces de réflexions précoces. Une recherche sur le positionnement des éléments de variabilité acoustique et sur la variabilité du positionnement des éléments réflecteurs sera nécessaire : absorption variable sur des surfaces proches ou éloignées des spectateurs, devant ou derrière les réflecteurs ; possibilité de déplacement ou d'un réglage en hauteur des réflecteurs au plafond. De manière plus générale, la visibilité ou non de la variabilité acoustique pourra également jouer un rôle dans la conception architecturale de la salle.

En outre, comme décrit plus haut, une variabilité des conditions acoustiques sur scène est exigée de façon à adapter acoustiquement la scène aux différentes tailles de formation et aux différents styles musicaux envisagés.

ANNEXE : DEFINITION DES CRITERES ACOUSTIQUES

Les définitions adoptées dans ce document pour les critères objectifs de qualité acoustique sont conformes à celles de la norme internationale ISO 3382, y inclus les annexes de cette norme. À la réception des ouvrages, les mesures de critères acoustiques devront être faites conformément à cette norme.

Les critères plus classiques liés à l'isolation acoustique des bâtiments découlent des normes CEI, 717 1 et 2 et 140 – 1 à 10 et des normes liées aux textes réglementaires en vigueur.

Durées ou temps de réverbération (TR)

Les durées de réverbération exprimées en secondes par bande d'octave se définissent comme le temps nécessaire pour que le niveau de pression acoustique décroisse de 60 dB. Elles sont évaluées à partir des taux de décroissance des courbes de décroissance entre -5 et -35 dB.

Les valeurs pour les locaux destinés à la musique se rapportent :

- aux moyennes arithmétiques des valeurs de durées de réverbération mesurées par bande d'octave de fréquence médiane de 500 Hz et 1000 Hz ;
- à la valeur du temps de réverbération dans une bande d'octave donnée, lorsque cela est explicitement spécifié.

Les locaux autres que la salle de concert et la grande salle de répétition sont réputés meublés et inoccupés. La salle de concert et la grande salle de répétition sont quant à elles considérées, sauf mention contraire, occupées à 100 % de leur jauge, y inclus la présence d'un orchestre sur scène.

Durée de décroissance précoce EDT (Early Decay Time)

La durée de décroissance précoce EDT est une variante du temps de réverbération TR. Elle est calculée de la même façon que ce dernier, mais cette fois à partir des courbes de décroissance entre 0 et -10 dB.

Bass Ratio et Treble Ratio

Le « Bass Ratio » se définit comme le rapport de la moyenne arithmétique du temps de réverbération des bandes d'octave basses fréquences (125 Hz et 250 Hz), et de la moyenne arithmétique du temps de réverbération dans les deux bandes d'octave de fréquence médiane de 500 Hz et 1000 Hz.

Le « Treble Ratio » se définit comme le rapport du temps de réverbération dans une bande d'octave haute spécifiée (2 kHz ou 4 kHz), et de la moyenne arithmétique du temps de réverbération dans les deux bandes d'octave de fréquence médiane de 500 et 1000 Hz.

Clarté C80

Ce critère représente le rapport en décibels entre l'énergie arrivant au point de mesure pendant les 80 premières millisecondes après l'arrivée de l'onde directe (énergie précoce) et l'énergie arrivant après (énergie tardive).

Force sonore G ou G10

Ce critère mesure la force sonore ou l'amplification de la salle, et se mesure par une source sonore calibrée. Il se détermine comme étant le rapport en décibels entre la pression acoustique mesurée à un point donné dans la salle (réponse de la salle) et la pression acoustique d'une source omnidirectionnelle de la même puissance acoustique mesurée à une distance de 10 m en champ libre.

Force sonore précoce G80

Ce critère mesure l'énergie précoce de la réponse de la salle de façon calibrée. Il est défini par le rapport en décibels entre la pression acoustique correspondant à la partie précoce d'une réponse impulsionnelle mesurée dans la salle et la pression acoustique d'une source omnidirectionnelle de puissance équivalente mesurée à une distance de 10 m en champ libre.

La partie précoce de la réponse impulsionnelle considérée dans ce document s'étend de 0 à 80 ms après l'arrivée de l'onde directe au point de mesure.

Force sonore tardive G/80 ∞

Ce critère mesure l'énergie tardive apportée par la réponse de la salle. Il est défini par le rapport en décibels entre la pression acoustique correspondant à la partie tardive d'une réponse impulsionnelle mesurée dans la salle et la pression acoustique d'une source omnidirectionnelle de puissance équivalente mesurée à une distance de 10 m de la même source sonore dans un champ libre.

La partie tardive de la réponse impulsionnelle considérée dans ce document commence 80 ms après l'arrivée de l'onde directe au point de mesure, et termine lorsque le niveau sonore atteint le niveau de bruit de fond de la réponse impulsionnelle concernée.

Fraction d'énergie latérale précoce LF

Ce critère mesure la proportion d'énergie arrivant latéralement au point de mesure dans les 80 premières millisecondes de la réponse impulsionnelle.

Il est défini mathématiquement comme le rapport de l'énergie comprise dans la partie précoce de la réponse impulsionnelle mesurée à l'aide d'un microphone bidirectionnel figure de huit à l'énergie comprise dans la partie précoce de la réponse impulsionnelle mesurée à l'aide d'un microphone omnidirectionnel.

Coefficient de corrélation croisée interaural IACC

On définit mathématiquement le coefficient IACC comme le maximum de la valeur absolue de la fonction de corrélation croisée interaurale IACF dans l'intervalle -1 à +1 ms. La fonction de corrélation croisée interaurale étant définie, pour deux instants t_1 et t_2 donnés, par la formule mathématique suivante, p_l étant la pression acoustique à l'oreille gauche et p_r celle à l'oreille droite :

$$IACF_{t_1,t_2}(\hat{\phi}) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) p_r(t + \hat{\phi}) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}}$$

On définit le critère IACC[E, mid] comme la moyenne arithmétique des valeurs du coefficient IACC pour les trois bandes d'octaves 500Hz, 1kHz et 2kHz.

Les valeurs de t_1 et t_2 considérées sont : $t_1 = 0$ ms $t_2 = 80$ ms.

Critère ST1

Le critère le plus unanimement utilisé pour définir l'écoute des musiciens sur scène est le critère de « support » ST1. Le critère ST1 compare l'énergie sonore réfléchie (dans les 100 premières millisecondes), à l'énergie sonore propre de la source.

Il est défini comme le rapport (en dB) entre l'énergie sonore réfléchie entre 20 ms et 100 ms (donc en excluant le son direct) et le son direct « étendu » (entre 0 et 10 ms), mesuré à une distance de 1m.

Coefficients d'absorption

Les coefficients d'absorption α Sabine décrivent le pouvoir absorbant d'un matériau, en fonction de la fréquence. Les matériaux de revêtement ayant une fonction de traitement acoustique sont le plus souvent qualifiés dans les descriptifs acoustiques par les valeurs des coefficients d'absorption par bande d'octave.

La définition des coefficients d'absorption acoustique adoptée est celle de la norme internationale ISO 354.

Isolements acoustiques standardisés pondérés

Les isolements aux bruits aériens de l'espace extérieur sont normalisés par rapport à la durée de réverbération prise en compte pour le local. Celle-ci est fixée pour chaque local.

Ils sont notés $D_{nT,A}$, et $D_{nT,A,tr}$; isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit rose ou un bruit de trafic routier et sont exprimés en dB.

Ils sont évalués selon la Norme NF EN ISO 717-1 (classement français NF S 31-032-1) comme étant le résultat de la somme de l'isolement acoustique standardisé pondéré $D_{nT,w}$ et du terme d'adaptation C à un spectre de bruit rose ou C_{tr} à un spectre de bruit route.

Indice d'affaiblissement acoustique

Chaque paroi et composant de l'enveloppe est caractérisé par son indice d'affaiblissement acoustique global R_w exprimé en dB.

Cet indice d'affaiblissement est déterminé en laboratoire selon la norme NF EN 140-3, août 1995.

Tolérances

A chacune des valeurs demandées dans ce programme acoustique est associée une tolérance de mesurage explicité ci-dessous. Ces tolérances de mesurage ne peuvent en aucun cas être prises comme tolérance d'étude.

Les tolérances admises (à la fois pour les mesures et pour les simulations informatiques) sur les critères acoustiques objectifs correspondent, pour la totalité des critères, à un seuil de la perception humaine (« JND » : just noticeable difference). Elles sont spécifiées pour les différents critères comme suit :

- tolérance sur le temps de réverbération moyen dans la salle : $\pm 0,1$ secondes (ou $\pm 5\%$) ;
- tolérance sur les temps de réverbération par position dans la salle : $\pm 0,2$ secondes (ou $\pm 10\%$) ;
- tolérance sur les critères de clarté C80, force sonore G, force sonore précoce G80, force sonore tardive $G[80 \infty]$ et support ST1, par position dans la salle comme pour la moyenne : ± 1 dB ;
- tolérance sur les critères de LF et d'IACC : $\pm 5\%$

Ces tolérances ne seront admises que pour 20 % des places assises, les critères acoustiques mesurés devant se trouver dans les intervalles demandés de façon exacte pour au moins 80 % des places.

Tolérance sur les critères de bruit de fond et d'isolation acoustique : ± 3 dB.

Courbes gabarit des bruits de fond

Lorsque le critère est fixé par référence aux courbes NR, les niveaux de bruit de fond sont mesurés in situ par bandes d'octaves sur les fréquences médianes comprises entre 31,5 et 8.000 Hz. Le spectre mesuré est superposé au réseau de courbes « gabarits ». Le niveau NR correspondant au bruit mesuré est défini par la courbe supérieure non sécante la plus proche du spectre de bruit mesuré.

- Courbes PNC (Preferred Noise Criteria)
- - - - - Courbes NR (norme ISO)

