

MÜLLER – BBM

Opéra Bastille

Salle Liebermann

Robert-Koch-Straße 11
D-82152 Planegg
Allemagne
Tél. +49 (0)89 85602 - 0
Fax +49 (0)89 85602 - 111
www.MuellerBBM.de

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Müller
Tel. +49 (0)89 85602 - 278
GMueller@MuellerBBM.de

52 801/9 GHM/std
2003-01-14

Opéra Bastille Salle Liebermann

Acoustique de la construction
et acoustique de la salle

Dossier de consultation des entreprises

Rapport No. 52 801/9

Maître d'ouvrage:	Opéra National de Paris 120, rue de Lyon 75012 Paris
Maître d'œuvre:	M. Alain-Charles Perrot et M. Jean Bougeret 1, Rue Gluck 75009 Paris
Consultants en acoustique:	Gerhard Müller Michael Espig Eric Sturel
Nombre total de pages:	82 pages dont, 32 pages texte, 9 pages annexe 1 19 pages annexe 2 17 pages annexe 3 5 pages annexe 4

Table de matières

1	Prémisses	4
2	Bases de la consultation	4
3	Exigences acoustiques et mesures correspondantes	5
3.1	Exigences concernant l'acoustique de la construction et le bruit de fond dans la salle	5
3.2	Exigences concernant l'acoustique de la salle de répétition Liebermann	6
3.3	Exigences concernant l'acoustique des petites salles de répétition et des loges de chef d'orchestre	6
4	Conception acoustique de l'intérieur de la salle de répétition Liebermann	7
4.1	Préliminaires	7
4.2	Disposition de l'orchestre et du chœur dans la salle de répétition	7
4.2.1	Orchestre	7
4.2.2	Chœur	7
4.3	Surfaces de l'intérieur de la salle de répétition Liebermann	8
4.3.1	Revêtement du plafond	8
4.3.2	Revêtement des murs	9
4.3.3	Revêtement des portes	11
4.3.4	Revêtement des murs entre la salle de répétition et le stockage	11
4.3.5	Revêtement du sol dans la zone de l'orchestre	11
4.3.6	Revêtement du sol dans la zone du chœur	11
4.3.7	Surface à absorption variable	12
4.3.8	Éléments supplémentaires	13
4.3.9	Calcul des temps de réverbération pour les différentes configurations de la salle	13
5	Conception acoustique de l'intérieur des autres locaux	13
5.1	Revêtement dans le stockage	13
5.2	Revêtement à l'intérieur de la loge du chef d'orchestre	13
5.2.1	Murs	13
5.2.2	Plafond	14
5.2.3	Sol	14
5.3	Revêtement à l'intérieur des petites salles de répétition	14
5.3.1	Murs	14
5.3.2	Plafond	14
5.3.3	Sol	14
5.4	Corridor et foyer	14
5.5	Régie	15

6	Acoustique de la construction	15
6.1	Mesures effectuées à Paris	15
7	Réalisation des éléments constructifs	15
7.1	Procédés de construction	15
7.2	Parois délimitant les circulations et le foyer de 36,00 m à 39,80 m	16
7.3	Salle de répétition	17
7.3.1	Dalle du plafond à +39,80 m, entre la salle de répétition et les circulations	17
7.3.2	Mur de séparation entre la salle et le monte-chariots/la scène tournante	18
7.3.3	Mur de séparation entre la salle et le dégagement à partir de +39,80 m	20
7.3.4	Murs de séparation entre la salle de répétition et l'enceinte de la salle modulable à partir de +39,80 m	20
7.3.5	Plafond de séparation entre la salle de répétition et l'enceinte de la salle modulable à partir de +39,80 m	22
7.3.6	Séparation entre la salle et le stockage sous le podium du chœur	23
7.4	Régie	23
7.4.1	Mur de séparation entre la salle et la régie	23
7.4.2	Sol de la régie	24
7.5	Loges des chefs	24
7.5.1	Séparation entre les loges	24
7.5.2	Séparation entre les loges et le couloir	25
7.5.3	Isolation aux bruits d'impacts des loges	26
7.6	Petites salles de répétition	27
7.6.1	Séparation entre les salles de répétition	27
7.6.2	Séparation entre les salles de répétition et le couloir	27
7.6.3	Isolation aux bruits d'impacts des salles de répétition	29
7.7	Portes	30
7.8	Remarques supplémentaires	30
8	Ventilation et technique	30
8.1	Remarques générales	30
8.2	Centrales de traitement de l'air, pompes	31
8.3	Transmission du son par les canaux	31
8.3.1	Conception des canaux	31
8.3.2	Position des pièges à sons	31
8.3.3	Isolation des vibrations des canaux	32
8.4	Indications générales pour les installations sanitaires	32
9	Remarques générales	32

1 Prémisses

L'Opéra National de Paris envisage d'aménager une nouvelle salle de répétition pour l'orchestre et le chœur dans le volume initialement destiné à la salle modulable.

Pour la définition de l'acoustique de la salle, Aubry & Guiguet SCPA a effectué une étude qui analyse les possibilités offertes par l'espace et élabore des schémas d'implantation possibles.

La salle est conçue pour des répétitions. Des représentations publiques ne sont pas prévues.

On projette de mettre en place une acoustique variable afin de donner aux utilisateurs la liberté d'adapter l'acoustique aux besoins individuels et aux utilisations différentes.

Le document [2] précise qu'il ne s'agit pas de réaliser un studio d'enregistrement mais une salle de répétition à usage interne, ayant cependant des caractéristiques acoustiques près proches de celles d'un studio d'enregistrement, mais dans un volume adapté aux besoins de l'Opéra National de Paris. Il doit être possible d'y réaliser les enregistrements de travail. C'est pourquoi une régie est prévue dans un local annexe; celle-ci est isolée phoniquement, et on peut y piloter l'éclairage, la ventilation, la climatisation et l'acoustique de la salle. A côté de lieux d'une relevance acoustique, deux loges du chef, une loge d'artiste, trois petites salles de répétition, des aires de détente, des sanitaires, un local de stockage de 150 m² et des locaux techniques doivent être aménagés.

Dans la conception initiale du bâtiment, le volume de la salle modulable était séparé du reste de la construction au moyen de quelques joints, dont il faudra étudier le fonctionnement.

Le volume de la salle modulable est suffisamment grand pour qu'on puisse y installer une salle très appropriée pour des répétitions de l'orchestre.

Afin de définir les besoins acoustiques, des mesures ont été effectuées dans la salle; celles-ci servent de base à la définition de l'isolation phonique des surfaces et à la détection de possibles interférences causées par le métro qui passe au voisinage du bâtiment.

Les mesures sont documentées dans [4]. A l'exception de la description des mesures, ce document remplace le document [4].

2 Bases de la consultation

- [1] "Etude de Faisabilité, Projet de Studio d'Enregistrement et de la Salle de Répétitions, Salle modulable de l'Opéra Bastille", Aubry & Guiguet SCPA, 24 juin 1999.
- [2] "Programme de Construction de la salle Rolf Liebermann", Opéra National de Paris, Direction Bâtiments et Investissement, 03 juin 2002
- [3] Etude préalable à la création de la salle Liebermann "aménagement pour les répétitions d'orchestres", septembre 2002, Alain-Charles Perrot

[4] Opéra Bastille, Salle Liebermann, Acoustique de la construction et acoustique de la salle, Avant Projet Sommaire, Rapport No. 52 801/5 de Müller-BBM du 23.10.2002

[5] CATT-Acoustic V7.2m, programme de calcul pour l'acoustique des salles

3 Exigences acoustiques et mesures correspondantes

3.1 Exigences concernant l'acoustique de la construction et le bruit de fond dans la salle

Les exigences concernant l'acoustique de la construction et l'acoustique de la salle sont spécifiées pour la salle de répétition et pour les locaux adjacents qui seront construits.

Les exigences concernant l'isolation phonique [2] sont données entre parenthèses dans la table 1. Les valeurs ont été adaptées par Müller-BBM après des mesures effectuées dans le bâtiment et en tenant compte du planning actuel :

Table 1. Exigences concernant l'isolation phonique [2]

	Niveau de bruit de fond maximum	$D_{n,w}$ vis-à-vis de la circulation	$D_{n,w}$ vis-à-vis des autres locaux	$D_{n,w}$ vis-à-vis de l'extérieur	$L_{n,w}$ pour tous les locaux mitoyens
Salle de répétition	PNC 15 ¹	(60) ≥ 55 dB	(80) ≥ 60 dB	(65) ≥ 55 dB	30
Loge du chef	30 dB(A)	(30) ≥ 45 dB	(50)	(35) (≥ 55 dB)	(40)
Régie	35 dB(A)	(30)	(50)	(30)	(45)
Stockage	50 dB(A)	-	-	-	-

¹ Le niveau maximum admissible PNC 15 est donné dans figure 1, annexe1.

3.2 Exigences concernant l'acoustique de la salle de répétition Liebermann

Les exigences concernant l'acoustique de la salle [2] sont données dans la table 2.

Table 2. Exigences concernant l'acoustique intérieure de la salle de répétition

Durée de réverbération	Réglable de 1,2 à 1,6 s, pente régulière (+ 50 % grave – 20 % aiguë) ^{2,3}
Force sonore	G: < -23 dB(A), écarts maxi entre bande d'octave ± 2 dB (63 Hz à 4 kHz). ⁴
Clarté (C80)	La plus élevée possible compatible avec la durée de réverbération.
Contact entre musiciens	Le plus élevé possible pour une bonne intimité y compris en formation réduite (réflecteurs, décors d'orchestre mobiles, etc.).

Pour étudier les exigences concernant l'acoustique de la salle il faut considérer qu'un maximum de 120 musiciens de l'orchestre et 100 membres du chœur peuvent se trouver dans la salle. Le minimum est constitué par un petit groupe de musiciens. Pour cette variation du nombre d'utilisateurs, une acoustique variable permettant d'adapter la salle à des conditions différentes doit être conçue.

Le volume de la salle de 5100 m³ donne une bonne possibilité d'adaptation à différentes utilisations.

Au moyen d'éléments diffus-réfléchissants, une bonne distribution du son doit être obtenue, permettant un contact optimal entre les membres de l'orchestre.

Grâce à un sol adapté, les musiciens peuvent sentir les vibrations transmises par les violoncelles.

3.3 Exigences concernant l'acoustique des petites salles de répétition et des loges de chef d'orchestre

Au rez-de-chaussée il est prévu d'intégrer des petites salles de répétition et des loges de chef d'orchestre. Celles-ci vont être dotées d'un revêtement intérieur diffus-réfléchissant et d'une acoustique variable de manière à y pouvoir adapter les conditions aux besoins individuels des utilisateurs.

² L'adaptation de la pente ne peut pas être garantie dans toutes les conditions. Due à la grande variation du nombre des musiciens, la durée de la réverbération sera choisie plus variable.

³ Due à la grande variation de l'absorption avec les rideaux, même avec un plein orchestre un temps de réverbération un peu plus élevé peut être obtenu.

⁴ La force sonore G10 qui est donnée dans les résultats dans l'annexe 2 diffère de la force sonore ici spécifiée par un valeur de -31 dB, c'est-à-dire G10 = 0 est équivalent à G = -31 dB.

4 Conception acoustique de l'intérieur de la salle de répétition Liebermann

4.1 Préliminaires

Comme les surfaces de l'intérieur de la salle de répétition sont conçues indépendamment des éléments prévus pour l'isolation phonique, la construction de ces derniers et celle des éléments qui servent à l'acoustique de la salle sont décrits séparément.

Les éléments diffus-réfléchissants sur les murs et sous le plafond servent à obtenir une bonne distribution sonore dans la salle et des réflexions utiles pour tous les membres de l'orchestre. L'absorption variable sur les surfaces qui ne couvrent pas complètement les parois ne réduit pas le bon contact entre les membres de l'orchestre.

4.2 Disposition de l'orchestre et du chœur dans la salle de répétition

4.2.1 Orchestre

La disposition de l'orchestre est prévue de manière à ce qu'il y ait une grande liberté de placer les membres selon le choix du chef d'orchestre. C'est pourquoi il n'est pas prévu d'installer des podiums dans une position fixe. On envisage de placer les membres de l'orchestre sur des samias qui peuvent être gardés dans le stockage au-dessous du chœur. Pour améliorer le contact entre les membres des petits ensembles on prévoit des panneaux mobiles qu'on peut installer selon le choix du chef d'orchestre.

4.2.2 Chœur

Dans la partie réservée au chœur, des éléments fixes sont prévus, sur lesquels on posera les samias selon le choix individuel du chef d'orchestre. Néanmoins, il est important de garantir la visibilité de chaque membre du chœur pour le chef d'orchestre – même assis. Il n'est pas prévu de donner aux choristes la possibilité de se déplacer. Cela aide au contact entre les différents membres du chœur. Donc, il n'est pas recommandé d'installer des chaises fixes pour les membres du chœur. Une distance fixe entre des chaises réduit la liberté de mouvement et le contact entre les membres du chœur.

La distance entre les membres du chœur est limitée par la dimension des samias de 1 m.

4.3 Surfaces de l'intérieur de la salle de répétition Liebermann

4.3.1 Revêtement du plafond

Dans les coins des ouvertures pour l'extraction de l'air sont prévues. La surface totale de ces ouvertures est limitée à 50 m²⁵ pour l'ensemble de la salle. Il est prévu de concentrer les surfaces absorbantes dans les zones latérales et les surfaces réfléchissantes dans la zone centrale.

4.3.1.1 Revêtement réfléchissant

En-dessous du plafond et sa structure porteuse, on prévoit, dans la zone centrale (env. 300 – 320 m² de la surface), des éléments réfléchissants courbés d'une manière convexe. Les éléments sont inclinés avec un angle d'environ 1°– 2°. Les éléments ont la caractéristique suivante :

- rayon de courbure: 6 m
- largeur des éléments: environ 2,5 m
- masse surfacique des éléments (sans considérer la masse de la structure portante): $m' \geq 15 \text{ kg/m}^2$
- type de surface: du point de vue acoustique bois ou alternativement plâtre

Remarques supplémentaires:

Du point de vue acoustique, il est possible de changer le type de surface entre les éléments.

Du point de vue acoustique il serait aussi possible d'utiliser deux plaques de plâtre dont une plaque est perforée (avec la même surface comme dans la zone des revêtements absorbants, voir 4.3.1.2) et la seconde plaque directement collée sur la plaque perforée.

Comme la hauteur du plafond est d'à peu près 10 – 11 m, il n'est pas nécessaire d'ajouter des réflecteurs supplémentaires. Si on installait des réflecteurs supplémentaires, la situation dans la salle de répétition (premières réflexions du plafond) serait trop différente de la situation dans la salle principale de l'opéra.

⁵ Ce chiffre dépend de la ventilation (voir point 8).

4.3.1.2 Revêtement absorbant

En-dessous du plafond et sa structure porteuse, on prévoit sur env. 200 m² de la surface des éléments absorbants. Les éléments doivent avoir une inclinaison par rapport à l'horizontale de $\geq 3^\circ$ ou doivent être intégrés dans les éléments courbés (4.3.1.1). La composition suivante est proposée (de haut en bas) (voir page 4, annexe 2) :

au-dessus des coursives latéralement tout autour de la salle :

- distance au plafond $d \geq 200$ mm
- laine minérale 50 mm (cachée sous un non-tissé ou emballée sous un film de polyéthylène $s \leq 20$ μm)
- métal perforé (surface perforée > 40 %)

dans la zone des éléments courbés :

- distance au plafond $d \geq 200$ mm
- laine minérale 50 mm (cachée sous un non-tissé ou emballée sous un film de polyéthylène $s \leq 20$ μm)
- 9,5 mm placoplâtre courbé perforé (surface perforée $> 10-20$ %) ⁶

du point de vue acoustique il serait alternativement possible d'utiliser :

- plaque de bois perforé (surface perforée $> 10-20$ %)

Remarques supplémentaires:

Du point de vue, acoustique il est possible de changer le type de surface entre les éléments.

4.3.2 Revêtement des murs

4.3.2.1 Revêtement réfléchissant

Un total d'env. 550 m² de la surface des murs possède un revêtement réfléchissant : celui-ci est constitué, comme la surface du plafond, d'éléments courbés de manière convexe. Les surfaces ont les caractéristiques suivantes :

- rayon de courbure: 6 m à 8 m
- largeur des éléments: env. 2,5 m
- masse surfacique (sans considérer la masse de la structure portante) : $m' \geq 20$ kg/m²
- type de surface: bois ou alternativement plâtre

⁶ Par exemple, diamètre des trous 12 ou 20 mm, espacement entre les centres des perforations 46 mm.

Remarques supplémentaires:

Du point de vue acoustique il est possible de changer le type de surface entre les éléments, ce qui est prévu dans le planning architectural.

4.3.2.2 Revêtement absorbant les basses fréquences

Un total d'env. 150 m² de la surface des murs est recouvert d'un revêtement absorbant les basses fréquences (page 10 et 11, annexe 2), dont (du mur à l'intérieur de la salle):

- deux couches placoplâtre 9,5 mm courbées non perforée ou bois avec une masse surfacique de < 8 kg/m². La distance entre les couches est variable :
 - env. 50 m² avec une distance entre les couches d = 40 mm
 - env. 50 m² avec une distance entre les couches d = 60 mm
 - env. 50 m² avec une distance entre les couches d = 80 mm
- laine minérale entre les deux couches

ou alternativement⁷

- une couche placoplâtre 9,5 mm :
 - env. 50 m² à une distance au mur d = 20 mm
 - env. 50 m² à une distance au mur d = 30 mm
 - env. 50 m² à une distance au mur d = 40 mm
- laine minérale 20 mm (directement fixée sur le placoplâtre)

4.3.2.3 Revêtement absorbant

Un total de 120 m² de la surface des murs peut être équipé d'un revêtement absorbant (page 10 et 11, annexe 2). Cette option est possiblement prise après la définition des ouvertures de la ventilation et l'achèvement du reste des détails.

Ce revêtement absorbant peut être intégré dans les murs au-dessus de la courserie technique sans changer l'architecture de la salle. C'est pourquoi on propose d'intégrer ces éléments après les mesures du temps de réverbération dans la salle et selon les besoins des musiciens. On propose de laisser les murs dans la zone de la courserie jusqu'à ce moment sans revêtements absorbants.

⁷ Cette solution n'est pas prévue due au fait qu'une surface homogène est préférée du point de vue architectural. Avec la solution des deux couches de placoplâtre courbées, on peut obtenir des absorbants de basses fréquences présentant le même aspect extérieur que les autres réflecteurs. En plus, le danger des échos répétitifs dû à un parallélisme des surfaces va être éliminé.

4.3.3 Revêtement des portes

a) Portes d'entrée

Les portes peuvent être planes avec des surfaces en bois. La masse surfacique peut être réduite ici à 15 kg/m².

b) Portes vers la zone de stockage

En-dessous du podium destiné au chœur, il y a une zone de stockage. La séparation est réalisée au moyen d'une porte dont la surface est identique à celle des parois voisines. Pour faciliter la construction, la porte peut être plane. La masse surfacique peut être réduite ici à 10 kg/m².

4.3.4 Revêtement des murs entre la salle de répétition et le stockage

Les surfaces du revêtement des murs entre la salle de répétition et le stockage vont être constituées d'éléments diffus-réfléchissants, comme celles des autres murs (voir 4.3.2.1). Comme il n'existe entre cette zone et la salle qu'une séparation visuelle, une isolation phonique élevée dans cette région n'est pas requise.

Si les éléments diffus-réfléchissants ne sont pas utilisés, on y peut –alternativement et du point de vue acoustique moins efficace - utiliser des surfaces inclinées (angle d'inclinaison de 3 – 5°, qui s'ouvre du sol vers la direction perpendiculaire).

On suppose qu'il y aura un contrôle de l'utilisation de la zone de stockage pendant les répétitions. Pour assurer ce contrôle, il est recommandé de ne pas prévoir une isolation phonique élevée afin de donner à la personne qui se trouve dans la zone de stockage la sensation qu'elle peut déranger les répétitions.

4.3.5 Revêtement du sol dans la zone de l'orchestre

Pour obtenir la sensation d'un sol vibrant, un plancher sur lambourdes est préconisé. On recommande la construction suivante (de haut en bas) (voir page 2, annexe 3) :

- ≥ 40-50 mm surface en bois⁸ (de telle sorte qu'il ne produise pas de craquements)
- ≥ 40-50 mm vide avec des lambourdes et 30 mm laine minérale
- dalle en béton armé
- structure assurant l'isolation phonique

4.3.6 Revêtement du sol dans la zone du chœur

On recommande le même revêtement que celui décrit en 4.3.5 dans la zone du chœur. Néanmoins, on pourrait aussi installer une construction directement collée sur une dalle en béton armé.

⁸ Bois massif ou couche de bois massif sur panneaux contrecollés.

Dans la zone du sas acoustique (séparation entre la salle de répétition et les monte-chariots) une dalle avec un isolement acoustique suffisant doit être prévu (voir page 3, annexe 3).

4.3.7 Surface à absorption variable

On projette d'introduire une absorption variable au moyen de rideaux mobiles. L'absorption minimale correspond à une configuration où les rideaux sont enroulés dans la partie supérieure de la salle. Pour réduire le temps de réverbération, ces rideaux peuvent s'abaisser sur toutes les cotés jusqu'à +42,30 m et derrière le chef d'orchestre jusqu'à la gaine de soufflage.

Il va être possible de contrôler le mouvement du rideaux pour chaque bande (largeur env. 2,50 m, avant chaque élément de revêtement réfléchissant).

Type A (bande d'absorption large BL): env. 550 m², résistance au flux 1000 Ns/m³ - 1500 Ns/m³ et distance à la surface des réflecteurs ≥ 10 cm, masse surfacique ≥ 0,5 kg/m² (page 10 et 11, annexe 2).

L'absorption nécessaire est donnée dans la table 3 et doit être vérifiée avant l'installation du rideau au moyen d'un test d'acoustique:

Table 3. Absorption du rideau

Bande d'octave (Hz) :	125	250	500	1000	2000	4000
Coefficient d'absorption :	0,25	0,35	0,40	0,65	0,75	0,75

Le coffre dans lequel le rideau sera enroulé créera un absorbant de basses fréquences dans la situation où le rideau est abaissé. Pour obtenir cette caractéristique favorable le coffre doit être réalisé de la manière indiquée page 4, annexe 3 avec de la laine minérale à l'intérieur.

La surface de la section de ce coffre sera dans un range entre 0,15 m² – 0,30 m², c'est-à-dire que le volume par chaque mètre de ce coffre sera 0,15 m³ – 0,30 m³ (25 % 0,15 m³, 25 % 0,20 m³, 25 % 0,25 m³, 25 % 0,3 m³). L'ouverture pour passer le rideau a une dimension d'environ 5 cm.

Par moyen de cet élément une légère ouverture du coffre peut créer un absorbant de basses fréquences sans baisser le rideau complètement. Pour la situation avec des rideaux abaissés, l'absorption des basses fréquences sera augmentée.

4.3.8 Eléments supplémentaires

Tout autour de la salle une coursive est prévue. Cette coursive est équipée d'un réflecteur. Le poids surfacique de ce réflecteur doit dépasser 15 kg/m².

De plus, des réflecteurs phoniques sont appliquées sur les parois pour optimiser la diffusion. Ils sont montrés page 15, 16, annexe 3. Le poids surfacique de ce réflecteur doit dépasser 15 kg/m². La surface orientée vers la salle est réfléchissante, Ce revêtement absorbant peut être intégré dans les murs au-dessus de la coursive technique sans changer l'architecture de la salle.

Une surface derrière absorbante (p. ex. laine minérale 50 mm dans un emballage de polyéthylène) peut être intégrée après les mesures du temps de réverbération dans la salle et selon les besoins des musiciens. On propose de laisser ces surfaces jusqu'à ce moment sans revêtements absorbants.

4.3.9 Calcul des temps de réverbération pour les différentes configurations de la salle

Les résultats du calcul des temps de réverbération pour les différentes configurations de la salle sont donnés dans l'annexe 5.

L'annexe 5 montre aussi la distribution sonore calculée sur la base d'une simulation numérique [5].

5 Conception acoustique de l'intérieur des autres locaux

5.1 Revêtement dans le stockage

Aucune surface de stockage n'a de traitement acoustique. Il est prévu qu'il n'y a personne dans le stockage quand il y a une répétition dans la salle.

5.2 Revêtement à l'intérieur de la loge du chef d'orchestre

5.2.1 Murs

Le revêtement des murs de la loge du chef d'orchestre sera diffus-réfléchissant ou absorbant. Les diffuseurs auront une masse surfacique ≥ 15 kg/m².

50 % de la surface des murs est équipée d'éléments mobiles. La surface absorbante de ces éléments sera constituée d'un revêtement en bois perforé. La surface réfléchissante sera plissée, les plis ayant une inclinaison de 5°. Du point de vue acoustique, il est nécessaire qu'on ait dans la position réfléchissante des jonctions hermétiques entre les éléments (voir page 5, annexe 3).

Alternativement une structure identique à celle montrée page 6, annexe 3 peut y être utilisée.

Alternativement une solution qui évite des surfaces parallèles peut être choisie (voir page 9, annexe 1). Dû a la construction des murs ces surfaces peuvent être construit par les murs séparant (voir 7.5.1), indiquées ou par un vide variable entre le panneau de placoplâtre et la construction en maçonnerie ou béton armé (voir 7.5.3) . Dans cette solution un mur sera équipé avec un rideau avec la même qualité indiqué en 4.3.7.

5.2.2 Plafond

Le revêtement du plafond sera à 50 % réfléchissant, et à 50 % absorbant. Les surfaces réfléchissantes se trouveront au milieu de la salle et sont inclinées pour éviter des échos répétitifs.

5.2.3 Sol

On recommande de recouvrir le sol de parquet.

5.3 Revêtement à l'Intérieur des petites salles de répétition

5.3.1 Murs

Le revêtement des murs dans la petite salle de répétition sera diffus-réfléchissant ou absorbant. Les diffuseurs auront une masse surfacique $\geq 15 \text{ kg/m}^2$.

La page 6, annexe 3 montre quelques possibilités des surfaces diffus-réfléchissantes.

Alternativement une solution qui évite des surfaces parallèles peut être choisie (voir page 9, annexe 1). Dû a la construction des murs ces surfaces peuvent être construit par les murs séparant (voir 7.6.1), indiquées ou par un vide variable entre le panneau de placoplâtre et la construction en maçonnerie ou béton armé (voir 7.6.3) . Dans cette solution un mur sera équipé avec un rideau avec la même qualité indiqué en 4.3.7.

5.3.2 Plafond

Le revêtement du plafond sera à 50 % réfléchissant, et à 50 % absorbant. Les surfaces réfléchissantes se trouveront au milieu de la salle et seront inclinées pour éviter des échos répétitifs.

5.3.3 Sol

Le sol sera recouvert de parquet.

5.4 Corridor et foyer

Pour améliorer le confort dans les corridors et le foyer, on recommande de prévoir un plafond absorbant et une moquette.

Alternativement il est possible d'utiliser du linoléum.

5.5 Régie

Le temps de réverbération dans la régie doit être limité dans toutes les bandes de fréquences à $T \approx 0,3$ à $0,5$ s. L'aménagement intérieur est le suivant:

- utilisation de moquette sur le sol
- couverture de tous les murs avec un revêtement absorbant (du mur à l'intérieur) :
 - distance aux murs ≥ 100 mm
 - 50 mm laine minérale (recouverte d'un non-tissé ou emballée sous un film de polyéthylène)
 - 12,5 mm placoplâtre perforé (surface perforée $> 20\%$)⁹

ou alternativement

- métal perforé, épaisseur environ 1 mm (surface perforée $> 20\%$)

ou alternativement

- bois perforé, (surface perforée $> 20\%$)

En fonction du mobilier de la salle, on définira des absorbants supplémentaires pour les basses fréquences.

Sous le plafond, on utilise la même structure que sur les murs en ajoutant une couche absorbante de laine minérale sur le faux-plafond. La distance de suspension du faux-plafond absorbant doit être ≥ 300 mm.

6 Acoustique de la construction

6.1 Mesures effectuées à Paris

Les mesures effectuées à Paris et leurs résultats sont décrits dans le rapport [4], point 6. Elles ont permis d'établir les valeurs nécessaires pour l'isolation phonique (voir table 1).

7 Réalisation des éléments constructifs

7.1 Procédés de construction

Partant des résultats des mesures, nous proposons de procéder comme suit:

Les murs délimitant les circulations et les autres locaux au niveau 0 peuvent être une construction massive en maçonnerie (masse volumique $\rho \geq 1,8 \text{ kg/dm}^3$) ou en béton armé. Un découplage acoustique de ce niveau n'est pas nécessaire.

⁹ Par exemple, diamètre des trous 12 ou 20 mm, espacement entre les centres des perforations 46 mm.

Par contre, la dalle située sous la salle de répétition reposera, à une hauteur de +39,80 m, sur les murs délimitant les circulations et les autres locaux, par l'intermédiaire d'appuis élastiques (élastomère ou ressorts métalliques de fréquence propre < 10 Hz). La position de la séparation est indiquée dans les pages 6 et 7, annexe 1.

L'enceinte de la salle de répétition sera une construction légère. Afin de pouvoir réaliser la hauteur de construction requise – plus de 11 mètres –, un treillis d'acier sera nécessaire, treillis auquel sera fixée une construction légère faite d'armatures d'acier et de panneaux de placoplâtre. L'ensemble des murs de la salle de répétition reposera sur la dalle sur appuis élastiques, à une hauteur de 39,80 m, et sera ainsi pareillement découplé du bâtiment existant.

Le plafond de la salle de répétition sera une construction légère à double paroi, à l'intérieur de laquelle prendra place un treillis d'acier. La structure porteuse du plafond pourra être fixée sur des appuis supplémentaires suffisamment élastiques sur des consoles murales.

Il est fondamental, que toutes les parois recouvrant les structures murales et du plafond soient, par souci d'isolation phonique, complètement hermétiques. Les perforations indispensables aux installations et aux fixations doivent être restreintes à un faible nombre d'emplacements équipés de pièges à sons qui ne réduisent pas les valeurs spécifiées pour l'isolation phonique.

Les revêtements intérieurs nécessaires à la qualité acoustique de la salle qui sont décrits dans le paragraphe 4, et qui recouvriront les murs et le plafond, constituent un dispositif indépendant et ne jouent donc aucun rôle dans l'isolation phonique. Leur fixation se fera directement sur la structure porteuse des murs ou du plafond, en des points d'accroche spécialement prévus à cet effet, hermétiquement fermés de manière à ce qu'il n'y ait pas une transmission supplémentaire du son par ces ouvertures.

7.2 Parois délimitant les circulations et le foyer de 36,00 m à 39,80 m

Il n'existe pas d'exigences particulières en ce qui concerne l'isolation phonique des circulations du niveau ±0 par rapport aux foyers des musiciens et aux sanitaires (hormis la salle de répétition située au-dessus, les loges et les salles de répétition). C'est pourquoi il n'est pas nécessaire, du point de vue acoustique, de placer, entre les circulations et le monte-chariots ainsi que le dégagement, des murs supplémentaires devant les murs existants.

Les murs sont nécessaires pour des raisons structurelles, afin de supporter l'ensemble de l'enveloppe de la salle de répétition.

Du point de vue acoustique, nous recommandons une construction d'épaisseur ≥ 200 mm en béton armé ou ≥ 240 mm en maçonnerie de masse volumique $\rho \geq 1,8$ kg/dm³. Ainsi on obtient, pour l'espace créé, un affaiblissement sonore d'au moins $R'_w = 53$ dB.

En dépit des exigences limitées, on devrait veiller à ce que subsiste un joint entre les nouveaux murs porteurs et les murs existants du côté du dégagement et du monte-chariots. Dans cet interstice, on devrait placer des plaques de séparation absorbantes en laine minérale, afin d'empêcher que des coulures de ciment ne compromettent cette isolation.

7.3 Salle de répétition

7.3.1 Dalle du plafond à +39,80 m, entre la salle de répétition et les circulations

Ce plafond doit être réalisé en béton armé et reposer élastiquement sur les murs entourant la circulation. Du point de vue acoustique, nous recommandons le schéma constructif suivant (de haut en bas) :

100 mm	Parquet sur lambourdes (page 2, annexe 3)
230 - 300 mm	Dalle en béton armé $m' \geq 650 \text{ kg/m}^2$ sur appuis élastiques (p. ex. $\geq 25 \text{ mm}$ d'élastomère ou ressorts métalliques)
300 mm	Vide, qui est réduit dans la zone des poutres à $\geq 50 \text{ mm}$
25 mm	placoplâtre 2x12,5 mm, couches superposées de façon à ce que les jointures soient recouvertes, et enduites, fixées à une structure élastiquement suspendue à la dalle, et doublées d'une couche de 80mm (30 mm dans la zone des poutres) de laine minérale

Revêtement acoustique du plafond

> 725 mm

La dalle sur appuis élastique doit être séparée des murs adjacents du côté de la scène tournante et du dégagement par un joint de $\geq 25 \text{ mm}$ de large.

L'assemblage ainsi décrit permet d'atteindre $D_{n,w} \approx 60 \text{ dB}$ (isolement pondérée $R'_w = 75 \text{ dB}$), si l'on considère que la transmission d'ondes sonores à travers les murs porteurs latéraux du niveau rez-de-chaussée est négligeable en raison de l'élasticité des joints.

7.3.2 Mur de séparation entre la salle et le monte-chariots/la scène tournante

7.3.2.1 Construction du mur

L'ouverture entre la salle de répétition et le monte-chariots doit être fermée par un mur massif. La véritable enveloppe de la salle de répétition devra se trouver devant ce mur. On propose le schéma constructif suivant (de l'extérieur à l'intérieur de la salle) :

- 240 mm Maçonnerie, masse volumique $\rho = 2000 \text{ kg/dm}^3$, non crépie¹⁰, jointures proprement finies
- ≥ 300 mm Espace comprenant:
 - Structure porteuse (p. ex. treillis métallique) montée sur la plaque élastiquement désolidarisée du mur en maçonnerie ou élastiquement fixée à celui-ci
 - 50 mm profilé métallique CW50x06, rigidement fixé à la structure porteuse
 - 160 mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12 \text{ kPa s.m}^{-2}$, p. ex. plaques d'isolation de façade)
- 37,5 mm 3 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites

Revêtement acoustique

> 578 mm

L'assemblage ainsi décrit permet d'atteindre $D_{n,w} \approx 60 \text{ dB}$. Ceci correspond à un affaiblissement acoustique pondéré $R'_w = 75 \text{ dB}$.

Remarque :

Partant d'une surface équivalente d'absorption de 400 m^2 (pour une durée de réverbération de 2 s.) on peut garantir entre la scène tournante et la salle de répétition une différence d'intensité sonore de 77 dB(A) pour des bruits à bande spectrale large. Lorsque le volet roulant entre le monte-chariots et la scène tournante est fermé, la différence d'intensité atteint 85 dB(A) . Cela autorise un niveau sonore moyen ambiant sur la scène de 100 dB(A) , sans que l'on ait à craindre des perturbations inacceptables dans la salle de répétition, c'est à dire un bruit de fond $\geq 20 \text{ dB(A)}$. Un tel niveau sonore ambiant peut effectivement être rencontré, mais reste néanmoins lié à des situations accidentelles, ou des événements rares et ponctuels.¹¹

¹⁰ Du point de vue esthétique les surfaces peuvent être crépies.

¹¹ Entre autres, par exemple : travaux de réparation, chutes d'objets lourds, utilisation de dispositifs pyrotechniques.

L'installation ainsi décrite présente donc, à notre sens, une isolation phonique en règle générale suffisante par rapport à la scène tournante, même si, en l'occurrence, on reste nettement en deçà de la valeur $D_{n,w} \geq 80$ dB [2].

7.3.2.2 Porte entre la scène tournante et le stockage sous le podium du chœur

Cette porte à double battant d'environ 4 m² constitue un point faible du point de vue acoustique. Elle doit obligatoirement être équipée d'un sas d'au moins 50 cm de largeur. Chaque double porte doit présenter un affaiblissement sonore de $R_w = 37$ dB (page 3, annexe 1). L'espace créé entre le mur extérieur en maçonnerie et la cloison légère va être fermé, à l'intérieur du sas, par un coffrage en placoplâtre.

On devra ce faisant ménager un interstice entre le pourtour du coffrage et le mur en maçonnerie, afin que la construction sèche ne soit pas rigidement liée à ce dernier.

De plus il faudra recouvrir ce coffrage d'un revêtement absorbant, constitué par exemple de plaques de métal perforées (25% de surface perforée) doublées par 60 mm de matériau absorbant. La construction de ce sas acoustique est montrée page 3, annexe 3, les surfaces intérieures, page 7, annexe 3.

Une mise en œuvre rigoureuse permettra d'obtenir un affaiblissement d'environ $R'_{w,res} = 50$ dB. Cela est juste suffisant si l'on peut admettre que le podium du chœur réalise, en tant que séparation entre le stockage et la salle de répétition, un affaiblissement d'environ $R'_w = 30$ dB.

7.3.2.3 Mesures additionnelles

Pour poursuivre l'amélioration de l'isolation phonique entre le monte-chariots et la salle de répétition, nous recommandons de conserver le rideau métallique qui les sépare, car il peut être utilisé comme une paroi supplémentaire. Dans ce cas, les mesures additionnelles suivantes sont à prévoir :

- L'espace créé entre le mur en maçonnerie et le rideau va être isolé phoniquement, par exemple en recouvrant le mur de plaques de laine minérale de 60 mm d'épaisseur.
- Un inconvénient en est que, pour atteindre la porte d'accès au stockage, il faut à chaque fois lever le rideau. Si l'on veut éviter cela, il faut fixer à 2,2 m la hauteur du bord inférieur du rideau baissé, et fermer l'espace résiduel avec un mur léger en maçonnerie (épaisseur 115 mm, masse volumique $\rho = 1,2$ kg/dm³) ou une cloison de 100 mm en placoplâtre. Dans ce mur il faudra ménager une porte d'accès supplémentaire, sans exigences particulières d'isolation phonique (valeur exigible $R_w \geq 20$ dB)

Ces mesures peuvent aussi être réalisées ultérieurement, car elles sont largement indépendantes des choix concernant le gros œuvre.

7.3.3 Mur de séparation entre la salle et le dégagement à partir de +39,80 m

7.3.3.1 Mur

La situation acoustique est ici dans l'ensemble un peu plus favorable que dans le cas du mur de séparation entre la salle et le monte-chariots, car à l'intérieur la future salle de régie vient s'ajouter comme zone-tampon. Sans prendre cette donnée en considération, nous recommandons de réaliser le mur de séparation conformément au paragraphe 7.3.2.

7.3.3.2 Mesures additionnelles

Nous recommandons de conserver le rideau métallique entre le dégagement et la salle, car il peut être utilisé comme une protection acoustique supplémentaire. Dans ce cas, les mesures additionnelles suivantes sont à prévoir :

- L'espace créé entre le mur en maçonnerie et le rideau doit être isolé phoniquement, par exemple entre recouvrant le mur de plaques de laine minérale de 60 mm d'épaisseur.
- Les défauts d'herméticité constatés, lors des mesures, au niveau du rideau, doivent être éliminés, par exemple au moyen d'un coffrage en panneaux de placoplâtre.

Ces mesures peuvent aussi être réalisées ultérieurement, car elles sont largement indépendantes des choix concernant le gros œuvre.

7.3.4 Murs de séparation entre la salle de répétition et l'enceinte de la salle modulable à partir de +39,80 m

L'usage futur de l'espace résiduel après insertion de la salle de répétition est inconnu. Nous partons du principe qu'une seule utilisation à des fins de stockage y est prévue, comme jusqu'à présent, et qu'aucun changement ne surviendra en ce qui concerne le niveau de bruit de fond actuel. Pour cette raison, on peut s'attendre à l'avenir à un niveau de bruit de $L_{AF,max} \leq 50$ dB(A). Les ouvertures existantes seront fermées.

Nous recommandons pour les murs et le plafond un affaiblissement sonore pondéré $R'_w \geq 65$ dB. Ceci correspond, pour une surface totale de séparation $S_T \approx 830$ m (plafond + mur) à une valeur $D_{n,W} \geq 46$ dB.

On propose pour les murs le schéma constructif suivant (en commençant de l'extérieur à l'intérieur de la salle) :

- 25 mm 2 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
- 50 mm profilé métallique CW50x06, élastiquement fixé à la structure porteuse
- ≥ 100 mm Structure porteuse (p. ex. treillis métallique), montée sur la plaque élastiquement désolidarisée ; à l'intérieur, 100 mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12 \text{ kPa s.m}^{-2}$, p. ex. plaques d'isolation de façade)
- 50 mm profilé métallique CW50x06, rigidement fixé à la structure porteuse
- 37,5 mm 3 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites

Revêtement acoustique

> 265 mm

Par une mise en oeuvre rigoureuse, en particulier une fixation élastique de l'enveloppe externe de la structure porteuse, on peut atteindre un affaiblissement significatif qu'on estime par expérience à $R'_w \geq 65 \text{ dB}$. Pour les basses fréquences ($f \leq 100 \text{ Hz}$) cette construction légère ne présente plus qu'un affaiblissement acoustique de $R' \approx 30 \text{ dB}$; ceci constitue néanmoins une protection suffisante face au bruit de fond dans le volume résiduel à l'intérieur du gros œuvre. Dans le cas de bruits usuels à spectre large, la différence de niveau sonore pondérée A entre le volume résiduel et la salle de répétition vaut environ 60 dB(A) ¹².

¹² Si on évalue la surface d'absorption équivalente de la salle à $A \approx 400 \text{ m}^2$.

7.3.5 Plafond de séparation entre la salle de répétition et l'enceinte de la salle modulable à partir de +39,80 m

Pour le plafond de la salle de répétition, on devrait mettre en œuvre une construction à double enveloppe similaire (schéma constructif, de haut en bas), voir page 8, annexe 3:

Alternative 1 :

- 25 mm 2 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
(autre alternative envisageable: planches d'aggloméré, afin que ce plancher soit accessible)
- 20 mm Couche sur laquelle on peut fixer le placoplâtre (p. ex. planche d'aggloméré)
- 50 mm Couche de laine minérale pour isolation au bruit d'impacts, rigidité dynamique $s' \leq 20 \text{ MN/m}^3$
Tôle perforée ou autre structure 'transparente' du point de vue acoustique (surface perforée $\geq 20 \%$)
Structure porteuse
Structure en profilés métalliques, fixée à la structure porteuse ; à l'intérieur, sur toute la surface, env. 140 mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12 \text{ kPa s.m}^{-2}$, p. ex. plaques d'isolation de façade)
- 25 mm 2 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites

Revêtement acoustique

> 2000 mm

Pour réaliser cette construction il est nécessaire que

- toutes les traversées de cette construction sont hermétiquement fermées
- les traversées de la ventilation sont équipées d'un piège à sons situé à l'extérieur de la construction, immédiatement avant la paroi (voir page 9, annexe 3).
- l'espace vide créé par la structure porteuse n'est pas utilisé par des installations techniques et qu'il soit fermé hermétiquement tout autour.¹³

¹³ Il est seulement prévu d'avoir une petite ouverture de contrôle qui permette d'accéder à cet espace.

7.3.6 Séparation entre la salle et le stockage sous le podium du chœur

Nous partons du principe que le stockage ne devrait être accessible qu'en dehors des répétitions. Une exploitation indépendante de cette pièce impliquerait des complications constructives par ailleurs injustifiées.

Le podium du chœur sera une construction légère, par exemple une structure porteuse en acier ou en bois recouverte de plaques d'aggloméré ou de bois massif. Une construction à double enveloppe n'est pas exigible du point de vue acoustique ; néanmoins la couverture doit être dense afin d'assurer un affaiblissement sonore pondéré d'environ $R'_w = 30$ dB. Ceci est rendu nécessaire par l'existence du sas entre le stockage et la scène tournante, et la gêne sonore accrue qui en résulte dans le stockage (voir 7.4.2).

7.4 Régie

7.4.1 Mur de séparation entre la salle et la régie

Le mur de séparation entre la salle et la régie doit garantir, en tenant compte des trois fenêtres, une valeur de $D_{n,w} \geq 50$ dB (ce qui correspond environ à un affaiblissement sonore $R'_w \geq 55$ dB). On propose pour le mur le schéma constructif suivant (en partant de la salle de régie) :

37,5 mm	3 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10$ kg/m ² , superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
100 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 80 mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12$ kPa s.m ⁻²)
10 mm	Couche intermédiaire élastique en néoprène ou en laine minérale entre les ossatures contiguës
100 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 80 mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12$ kPa s.m ⁻²)
25 mm	2 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10$ kg/m ² , superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
<hr/>	
273 mm	

Ce mur repose sur la dalle de la salle de répétition. Une exécution rigoureuse doit permettre d'atteindre un affaiblissement pondéré $R'_w \geq 65$ dB.

Du point de vue acoustique, il n'est pas nécessaire que le mur se prolonge sous cette forme jusqu'au plafond de la salle Liebermann. Au lieu de cela, la paroi située du côté de la régie peut s'arrêter au plafond de celle-ci. Au-dessus de la régie, il suffit que se prolonge la paroi située du côté de la salle de répétition. Il conviendra de préciser si une utilisation de l'espace situé au-dessus de la régie est envisagée.

Les fenêtres entre la salle et la régie doivent garantir un affaiblissement d'au moins $R_w = 50$ dB. A ce jour, il n'est pas prévu qu'elles peuvent s'ouvrir.

La construction de la fenêtre de la régie est montrée page 10, annexe 3.

Les passe-câble entre la régie et la salle de répétition doivent être équipés d'un piège à sons avec deux bouchons. La construction est montrée page 11 , annexe 3.

7.4.2 Sol de la régie

Le sol de la régie devra être double et recouvert de moquette. Il faudra utiliser un système permettant d'atteindre un affaiblissement des bruits d'impact de $\Delta L_{W,R} \geq 25$ dB (verticalement).

7.5 Loges des chefs

7.5.1 Séparation entre les loges

Les murs de séparation entre les loges des chefs d'orchestres, au niveau rez-de-chaussée, doivent garantir une valeur de $D_{n,w} \geq 55$ dB par rapport aux pièces mitoyennes (correspondant à un affaiblissement sonore $R'_w \geq 60$ dB) .

Nous recommandons une mise en œuvre en filière sèche selon le schéma constructif suivant (voir page 12, annexe 3):

37,5 mm	3 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
100 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 80mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12 \text{ kPa s.m}^{-2}$)
10 mm	Vide
100 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 80mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12 \text{ kPa s.m}^{-2}$)
37,5 mm	3 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
<hr/>	
285 mm	

Page 17, annexe 3 montre la connexion entre cette construction et le plafond.

Le faux plafond prévu en-dessous de la séparation entre le niveau 0 et le niveau 1 (plaque fixée élastiquement) est prévu aussi dans les loges des chefs d'orchestre (voir 7.3.1).

7.5.2 Séparation entre les loges et le couloir

Nous recommandons une mise en œuvre en filière sèche selon le schéma constructif suivant :

25 mm	2 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
75 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 50 mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12 \text{ kPa s.m}^{-2}$)
10 mm	Vide
75 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 50 mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12 \text{ kPa s.m}^{-2}$)
25 mm	3 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
<hr/>	
210 mm	

Page 17, annexe 3 montre la connexion entre cette construction et le plafond.

Une fois installées et fonctionnelles, les portes d'accès doivent présenter un affaiblissement sonore $R_w = 37$ dB. Il n'existe pas d'exigence d'isolation phonique en ce qui concerne les murs et portes situés à l'intérieur d'une loge, puisqu'on peut supposer que chaque loge n'est utilisée que par une personne.

7.5.3 Isolation aux bruits d'impacts des loges

Le niveau sonore normalisé pondéré dû aux bruits d'impacts requis pour les deux loges, valant $L'_{n,w} \leq 40$ dB, devrait être atteint par des mesures de réduction du rayonnement acoustique affectant la construction qui constitue l'enceinte des loges, et non (comme habituellement), par des mesures affectant les sols des sanitaires et foyer adjacents.

Les cloisons en placoplâtre des loges sont avantageuses du point de vue acoustique, car les panneaux de placoplâtre, légers et souples, ne rayonnent que peu d'énergie acoustique. Les plafonds des loges sont pourvus sur leur face inférieure d'un faux-plafond en placoplâtre (voir paragraphe 7.3), si bien que la dalle massive située au-dessus ne rayonne pratiquement pas d'énergie acoustique due aux impacts dans les loges.

La dalle massive servant de sol aux loges, coin nuit et salle d'eau inclus, doit avoir une construction élastique (dalle flottante sur couche d'isolation aux bruits d'impact). On propose le mode de construction suivant (de haut en bas) (voir page 12, 13, annexe 3):

10 mm	Revêtement (moquette ou parquet, dans la salle d'eau céramique) ¹⁴
≥ 50 mm	Couche de ciment
0,2 mm	Séparation par un film de polyéthylène
25 mm	Couche de laine minérale pour isolation aux bruits d'impacts, rigidité dynamique $s' \leq 20$ MN/m ³
env. 50 mm	Couche compensatrice (p. ex. panneaux de polystyrène expansé) pour l'installation de canalisations (si nécessaire)
≥ 200 mm	Dalle en béton armé (existante)

Les murs massifs du coin nuit et de la loge 2 doivent être dans chacune revêtus d'une paroi de placoplâtre. On recommande la construction suivante (page 14, annexe 3):

12,5 mm	Panneaux de placoplâtre sur armature autoportante CW 50x06 montée devant le mur
≥ 60 mm	Vide; à l'intérieur, couche de 40 mm de laine minérale ¹⁵
≥ 200 mm	Maçonnerie ou béton armé

¹⁴ Du point de vue de l'acoustique de la salle un parquet sera choisi.

¹⁵ Si le mur est introduit de manière inclinée le vide va changer.

Dans la salle d'eau, une telle construction n'est pas nécessaire, puisque cette pièce présente peu d'exigences acoustiques.

7.6 Petites salles de répétition

7.6.1 Séparation entre les salles de répétition

Les murs de séparation entre les salles de répétition, au niveau rez-de-chaussée, doivent garantir une valeur de $D_{n,w} \geq 55$ dB par rapport aux pièces mitoyennes (correspondant à un affaiblissement sonore $R'_w \geq 60$ dB) .

Nous recommandons une mise en œuvre en filière sèche selon le schéma constructif suivant :

37,5 mm	3 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10$ kg/m ² , superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
100 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 80mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12$ kPa s.m ⁻²)
10 mm	Vide
100 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 80mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12$ kPa s.m ⁻²)
37,5 mm	3 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10$ kg/m ² , superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
<hr/>	
285 mm	

Page 17, annexe 3 montre la connexion entre cette construction et le plafond.

Le faux plafond prévu en-dessous de la séparation entre le niveau 0 et le niveau 1 (plaque fixée élastiquement) est prévu aussi dans les petites salles de répétition (voir 7.3.1).

7.6.2 Séparation entre les salles de répétition et le couloir

Nous recommandons une mise en œuvre en filière sèche selon le schéma constructif suivant :

25 mm	2 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites
75 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 50 mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12 \text{ kPa s.m}^{-2}$)
10 mm	Vide
75 mm	Ossature en profilés métalliques CW100x06 ; à l'intérieur, 50 mm d'isolant à base de laine minérale (résistance au flux longitudinal $r \geq 12 \text{ kPa s.m}^{-2}$)
25 mm	3 épaisseurs de placoplâtre 12,5 mm, masse surfacique (pour 1 épaisseur) $m' \geq 10 \text{ kg/m}^2$, superposées de façon à ce que les jointures soient couvertes, et enduites

210 mm

Page 17, annexe 3 montre la connexion entre cette construction et le plafond.

Une fois installées et fonctionnelles, les portes d'accès doivent présenter un affaiblissement sonore $R_w = 37 \text{ dB}$.

7.6.3 Isolation aux bruits d'impacts des salles de répétition

Le niveau sonore normalisé pondéré dû aux bruits d'impacts requis pour les salles de répétition, valant $L'_{n,W} \leq 40$ dB, devrait être atteint par des mesures de réduction du rayonnement acoustique affectant la construction qui constitue l'enceinte des salles de répétition.

Les cloisons en placoplâtre des salles de répétition sont avantageuses du point de vue acoustique, car les panneaux de placoplâtre, légers et souples, ne rayonnent que peu d'énergie acoustique. Les plafonds des salles de répétition sont pourvus sur leur face inférieure de faux-plafond en placoplâtre (voir paragraphe 7.3), si bien que la dalle massive située au-dessus ne rayonne pratiquement pas, dans les salles de répétition, d'énergie acoustique due aux impacts.

La dalle massive servant de sol aux salles de répétition doit avoir une construction élastique (dalle flottante sur couche d'isolation aux bruits d'impacts). On propose comme dans les loges le mode de construction suivant (de haut en bas voir page 13, 14, annexe 3):

10 mm	Revêtement (parquet)
≥ 50 mm	Couche de ciment
0,2 mm	Séparation par un film de polyéthylène
25 mm	Couche de laine minérale pour isolation aux bruits d'impacts, rigidité dynamique $s' \leq 20$ MN/m ³
env. 50 mm	Panneaux de polystyrène expansé pour l'installation de canalisations (si nécessaire)
≥ 200 mm	Dalle en béton armé (existante)

Les murs massifs doivent être dans chacune revêtus d'une paroi de placoplâtre. On recommande la construction suivante :

12,5 mm	Panneaux de placoplâtre sur armature autoportante CW 50x06 montée devant le mur
≥ 60 mm	Vide; à l'intérieur, couche de 40 mm de laine minérale ¹⁶
≥ 200 mm	Maçonnerie ou béton armé

¹⁶ Si le mur est introduit de manière inclinée le vide va changer.

7.7 Portes

La qualité requise pour les portes est indiquée dans la pages 3 et 4, annexe 1.

Les valeurs d'affaiblissement sonore y figurant valent pour des portes installées, fonctionnelles, et en tenant compte de l'huissierie, des joints d'étanchéité et des plinthes en bas de porte. Les valeurs d'affaiblissement sonore obtenues pour des portes au banc d'essai acoustique, lors de mesures homologuées, doivent être chacune supérieure de 5 dB à celles requises pour des portes installées.

7.8 Remarques supplémentaires

Dans la zone des foyers et les autres zones une dalle flottante n'est pas nécessaire. La mise en oeuvre de la connexion entre la dalle flottante dans les loges du chef et les petites salles de répétition est montrée dans page 13, annexe 3.

8 Ventilation et technique

8.1 Remarques générales

Il est prévu de concentrer les arrivées d'air dans l'intersection entre les murs et le sol. Là, une ouverture totale d'env. 60 m^2 ¹⁷ est prévue.

L'extraction de l'air est concentrée dans la surface du plafond avec la même surface.

La ventilation doit être conçue de manière à ce que le seuil tolérable pour le bruit de fond (table 1) ne soit pas dépassé, en considérant toutes les sources sonores (lumière etc.).

Tous les locaux techniques consacrés à la ventilation se trouvent loin de la salle, et ne causeront donc pas de problèmes acoustiques pour la salle Liebermann, pourvu que des pièges à sons correctement dimensionnés soient utilisés.

Toutes les transmissions dues aux canaux d'air qui traversent les différentes pièces et entrent dans la salle doivent être examinées. Pour les salles voisines, il est nécessaire d'obtenir l'isolement acoustique au moyen de silencieux de traversée de mur (p. ex. voir. page 5, annexe 4). Pour contrôler les bruits qui sont transmis par les canaux d'air, il est envisagé d'intégrer des amortisseurs de son appropriés dans le système de canaux juste avant la traversée des murs latéraux de la salle modulable, ou mieux, directement avant la traversée de l'enceinte acoustique de la salle de répétition (voir page 4, annexe 4).

On suppose que la mise en place des installations sera faite en considérant les exigences acoustiques. Pour garantir l'isolation phonique, les machines seront installées de manière suivante:

¹⁷ Cette ouverture correspond à env. $67000 \text{ m}^3/\text{h}$.

8.2 Centrales de traitement de l'air, pompes

Dans les centrales techniques seront utilisées des machines de ventilation coffrées dans lesquelles les moteurs et les ventilateurs se trouveront sur des appuis élastiques. La fréquence propre de ces appuis devra être au moins 1,5 – 2 octaves en-dessous de la fréquence la plus basse d'excitation du moteur ou ventilateur. Pour une réduction supplémentaire des vibrations dans le bâtiment, il est nécessaire de mettre en œuvre une installation sur appuis élastiques. Deux alternatives sont proposées page 2, annexe 3

Les pompes doivent être installées sur des appuis élastiques (page 3, annexe 4).

8.3 Transmission du son par les canaux

Pour les murs et plafonds, l'isolation phonique nécessaire est définie dans l'annexe 1.

Au cas où il y aurait des canaux passe-câble etc. qui traversent ces parois, l'affaiblissement acoustique ne doit pas être réduit.

8.3.1 Conception des canaux

S'il y a une traversée de canal dans les salles de répétition ou dans les loges de chef d'orchestre ou d'artiste, il est nécessaire

- d'appliquer un piège à sons immédiatement avant le mur ou le plafond isolant.
- d'isoler les canaux dans les zones les plus bruyantes au moyen d'un coffrage (ou un système acoustiquement équivalent) :
 - env. 1 mm acier du canal
 - 100 mm laine minérale, $\rho \geq 50 \text{ kg/m}^3$
 - $\geq 20 \text{ mm}$ vide
 - 2 x 12,5 mm placoplâtre fermé hermétiquement autour des canaux

8.3.2 Position des pièges à sons

A l'extérieur des espaces présentant de hautes exigences acoustiques, il est nécessaire d'installer des pièges à sons

- dans la centrale technique et
- avant la pénétration du canal dans l'espace concerné.

L'idéal est que le piège à sons dans la centrale technique se trouve immédiatement avant la paroi délimitant la centrale de manière à éviter une transmission du bruit aérien de la centrale au canal en aval du piège à sons. Dans ce cas il est seulement nécessaire de coffrer le piège à sons.

Si cela n'est pas possible, les canaux entre le piège à sons et la paroi doivent être coffrés.

8.3.3 Isolation des vibrations des canaux

Derrière les centrales de traitement d'air les canaux doivent être séparés élastiquement, par exemple par moyen de manchons en toile.

Tous les appuis des canaux sur la structure du bâtiment sont isolés élastiquement, par exemple au moyen de suspensions élastiques en caoutchouc-métal, ou de bandes de néoprène.

Dans les traversées de murs ou de plafonds, les canaux doivent être isolés par exemple avec 10 mm de néoprène à pores fermés pour éviter des connexions rigides avec la structure du bâtiment.

8.4 Indications générales pour les installations sanitaires

Toutes les parois sur lesquelles des installations sanitaires sont prévues ont une masse de $m' \geq 220 \text{ kg/m}^2$. Du point de vue acoustique l'utilisation de blocs sanitaires séparés est préférable à une installation directe sur une paroi massive.


Les fixations de toutes les tuyauteries sur les murs seront faites au moyen de colliers pour tuyaux recouverts de néoprène.

Ces mesures d'isolation phonique sont aussi valables pour le chauffage. L'isolation de toutes les tuyauteries doit être faite jusqu'aux robinets. En cas d'utilisation de cuvettes de WC fixées sur les murs, un kit d'isolation acoustique doit être prévu. De plus, les lavabos doivent être installés en utilisant les kits d'isolation phonique prévus par les fabricants.

Entre les salles de répétition il est nécessaire d'installer des silencieux de traversée de mur pour obtenir l'isolation phonique nécessaire.

9 Remarques générales

- Les plans de réalisation pour les éléments acoustiques doivent être vérifiés avant de la mise en oeuvre.
- La caractéristique acoustique du rideau doit être vérifiée dans les laboratoires acoustiques.
- Due à la construction sophistiquée de la structure boîte-en-boîte, on recommande un control rigoureux de la mise en place.
- La décision sur les absorbants des murs latéraux au-dessus des coursives et derrière les réflecteurs va être prise après avoir terminé la salle et après avoir effectué les mesures de contrôle.


Gerhard Müller