



HAL
open science

L'espace de projection : 40 ans après, quel bilan ?

Pierre Millot

► **To cite this version:**

Pierre Millot. L'espace de projection : 40 ans après, quel bilan ?. Architecture, aménagement de l'espace. 2017. dumas-01712715

HAL Id: dumas-01712715

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01712715v1>

Submitted on 19 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'Espace
de projection 40 ans après,
quel bilan?

--	--	--

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

L'Espace
de projection 40 ans après,
quel bilan?

Pierre Millot

Mémoire

2015-2017

Sous la direction
de Laurent Lescop
& Bruno Suner

DE4: Architecture
en représentation

ENSA Nantes

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT DE PREMIER

L'Espace *de projection* 40 ans après, quel bilan?

Pierre Millot

Mémoire

2015-2017

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

I. Dans quel contexte l'Espace de projection a-t-il vu le jour?	11
A. Les salles du XVIII^e et XIX^e siècles	11
1. Des espaces en corps-creux	11
2. La salle de concert: un concept assez récent	12
3. Opéras	14
4. Points intéressants	15
a. Corrélation entre style et acoustique	15
b. Des notions d'acoustique très basiques	18
B. Une approche scientifique	20
1. W. C. Sabine (1868-1919)	20
2. État de l'art avant Sabine	21
3. L'expérience	22
C. Espaces contemporains à l'IRCAM	23
1. Un désir d'expérimenter	23
a. Le Philharmonie de Berlin	23
b. Expériences de Stockhausen	24
2. Acoustique variable: pourquoi?	26
3. Acoustique passive	28
a. Le modèle de l'Espro	28
b. Espaces couplés	29
4. Acoustique active	30
D. Petite synthèse	31

II. L'Espace de projection: une innovation technique?	33
A. Une initiative de Pierre Boulez: l'IRCAM	33
B. Rudiments d'acoustique	35
1. Introduction	35
2. Formule de Sabine	36
3. Formule d'Eyring	37
4. Que dire de ces modèles acoustiques?	38
C. L'Espace de projection: un outil musical?	39
1. Le bâtiment de l'IRCAM	39
2. L'Espace de projection	40
3. Les périactes	42
a. Descriptif	42
b. Influence de la position des périactes	44
4. Le plafond et rideaux	47
a. Descriptif	47
b. Influence de la hauteur du plafond	48
c. Influence du public	50
5. Eyring ou Sabine?	51
6. Hypothèse des champs diffus	52
7. Implémentation d'un système Wfs et ambisonique	53
8. En résumé	55
D. Quelles attentes pour l'Espace de projection?	58
1. Après son ouverture	58
2. Usage actuel	59
3. Un coup d'arrêt en 2011	60
E. Premières impressions	61

III. Comment la production contemporaine et l'Espace de projection se sont-ils influencés? 64

A. Et si on était un peu plus critiques? 64

1. Renouveler la musique contemporaine au début du xx^e siècle 64
2. Spatialisation: quelques exemples pré-Espro 65
 - a. Qu'est-ce-que la spatialisation? 65
 - b. Pierre Schaeffer et musique concrète 66
 - c. Le Pavillon Philips 67
 - d. Terretektorh 69
 - e. Carré 70
 - f. Polytopes 71
3. L'Espace de projection, un espace déjà en retard? 72
4. Spatialisation post-Espace de projection 75
 - a. Un premier constat pas si accablant 74
 - b. Répons 75
 - c. Quodlibet 76
 - d. Autres pièces 77
5. L'Espro un espace créateur 79

B. Retour sur le WFS et l'Ambisonie 80

1. Wave Field Synthesis 80
2. Ambisonics 81
3. Mise en œuvre 82

Conclusion 84

- Annexe 87
- Bibliographie 96
- Table des illustrations 99

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Le mélange entre théâtre et musique n'a rien d'original, au contraire, il est extrêmement commun et bien implanté dans les mœurs. Les Grecs par exemple accompagnaient leurs pièces de théâtre par de la musique, plus classiquement, comment ne pas faire référence à la collaboration régulière entre Molière et Lully? Mieux, quel meilleur exemple que l'opéra comme manifestation de ce mélange, où le théâtre illustre la musique?

C'est du moins l'état de la musique jusqu'à la moitié du XX^e siècle, mais c'est à cette époque-là qu'apparaissent des compositeurs comme John Cage, György Ligety ou Stockhausen. Ces compositeurs ont une nouvelle approche de la musique qui se solde par la création de *4'33* de John Cage, *Aventures et nouvelles Aventures* de Ligety, des œuvres qui ont un intérêt plus scénique que musical, et qui posent des questions quant à l'utilisation de l'espace alentour. On prend aussi le parti d'écrire des pièces destinées à un lieu spécifique. Non que ce soit original, en effet, les Kapelmeister comme Bach écrivaient déjà dans un cadre particulier, et nul doute que leur écriture a été conditionnée par leur lieu de travail. Dans le sens inverse, l'écriture d'un opéra est adaptée à une salle d'opéra, et celle d'un ensemble de chambre évidemment pour une salle plus petite. C'est encore plus poussé chez Wagner, qui a notamment ordonné la construction d'une salle adaptée particulièrement à ses œuvres, c'est l'opéra de Bayreuth. Le lien entre une œuvre et une salle a été exacerbé par Stockhausen, lors de l'Exposition universelle d'Osaka, et par Xenakis pour le pavillon Philips.

Le Pavillon Philips est d'ailleurs à placer dans la lignée des polytopes dans la mesure où Xenakis crée une œuvre spécialement pour celui-ci ou plutôt en parallèle de la création du Pavillon, alors

que les polytopes sont des œuvres créées pour des lieux en particulier qui sont transformés à multiples reprises par diverses techniques. Néanmoins, dans les deux cas, il s'agit de mettre en avant les possibilités musicales offertes par la technologie. Dans tous les cas, il y a un rapport complexe entre musique et architecture, on peut se poser la question de savoir si c'est la musique qui se soumet à l'espace, ou l'inverse, l'espace qui se soumet à la musique.

La salle de concert de l'IRCAM, autrement appelée *Espace de projection* ou *Espro*, est située à la pointe de la technologie, mettant en avant les nouvelles possibilités offertes par les progrès acoustiques au service du compositeur et/ou interprète.

Pour bien comprendre en quoi cette salle se démarque des autres salles, il semble fondamental d'avoir en tête un bref historique des avancées scientifiques en termes d'acoustique des salles, quelques exemples de salles plus classiques et d'autres éléments précurseurs. Une fois cette base construite, nous décrirons, le contexte dans lequel se sont déroulées la mise en place et la construction de cette salle, puis la salle elle-même, enfin l'usage que l'on en fait. Finalement, nous essaierons de réaliser un retour critique sur cette salle, par rapport à sa médiatisation, ses choix de mise en œuvre et sa place aujourd'hui par rapport à de nouveaux moyens d'expression musicale.

A. Les salles du XVIII^e et XIX^e siècles

1. Des espaces en corps-creux

La salle de l'*Espace de projection* a pour vocation première d'être une salle de concert et d'expérimentation. Aussi pour bien comprendre en quoi elle en est une, et quelles sont ses particularités, il semble nécessaire de tenter de visualiser les éléments types d'une salle de concert, si tant est qu'il en existe. Pour arriver à notre but, il est important de réaliser une brève chronologie des méthodes de réalisation des salles de concert, ainsi qu'une observation de diverses salles afin d'en extraire les éléments communs.

On peut distinguer deux types d'espaces dans lesquels se joue la musique: le corps-creux ou le plein-air. Dans le cadre de notre sujet, nous nous intéresserons plus aux corps creux.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2. La salle de concert: un concept assez récent

Parmi ces salles, on peut encore faire une distinction entre celles dédiées à un usage purement musical et celles dédiées au théâtre lyrique, à l'opéra.

La salle de concert telle qu'on peut la concevoir aujourd'hui sous la forme d'un auditorium où l'on écoute de la musique uniquement, sans se préoccuper de la machinerie de l'opéra, est assez récente. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, les concerts avaient le plus souvent lieu là où l'on pouvait les accueillir, rarement dans des salles qui leur étaient spécifiquement dédiées. Les concerts prenaient donc place le plus souvent dans les salons des palais comme la salle Haydnsaal^{Fig.1} appartenant à la famille Esterházy à Eisenstadt en Autriche. À titre de comparaison, cette salle est susceptible d'accueillir 400 personnes tandis que la salle Pleyel peut accueillir plus de 1500 personnes, pour une programmation similaire, de type symphonie, ou musique de chambre.

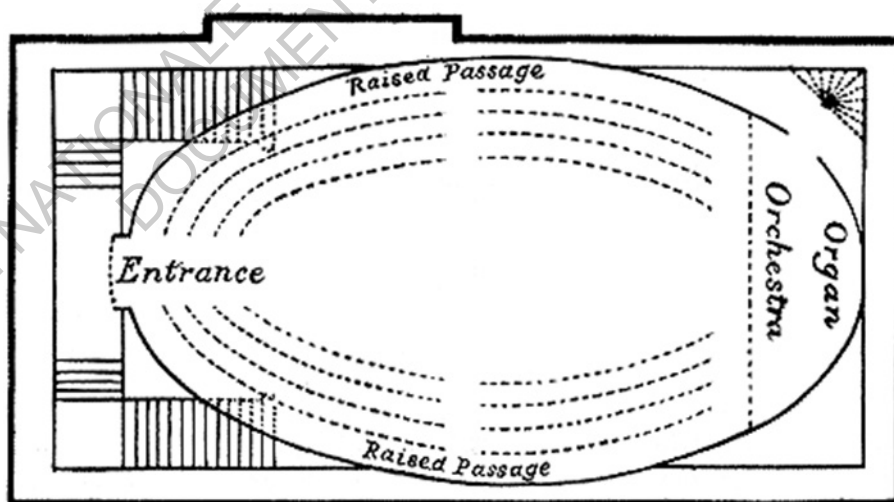


1

Haydnsaal, Eisenstadt.

En France, les orchestres se produisent dans des théâtres, en Italie dans des orphelinats ou conservati/ospedali. L'accès à ces salles reste limité aux sphères les plus aisées. On trouve cependant quelques exemples de salles publiques comme la Gewandhaus de Leipzig, le St-Cecilia's Hall d'Edimbourg **Fig.2,3** ou la Holywell Music Room d'Oxford.

On ne trouve toutefois pas d'espaces créés avec une conscience aiguë des qualités acoustiques que pourrait produire une salle par sa forme ou ses matériaux, en atteste par exemple le plan en ellipse du St-Cecilia's Hall qui est une aberration d'un point de vue acoustique, à cause des deux foyers que possède l'ellipse. La qualité principale que doit avoir une salle de concert est d'abord d'offrir un bon rapport visuel à l'orchestre, mais surtout de pouvoir accueillir un maximum de personnes.





3

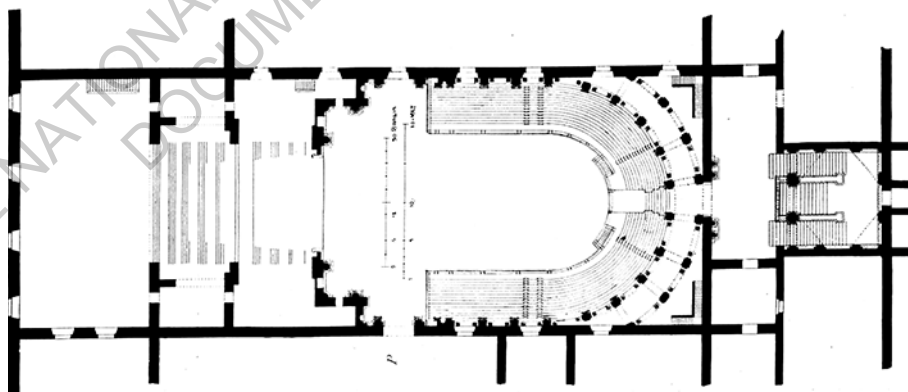
Vue intérieure Saint Cecilia's Hall, Edimburgh.

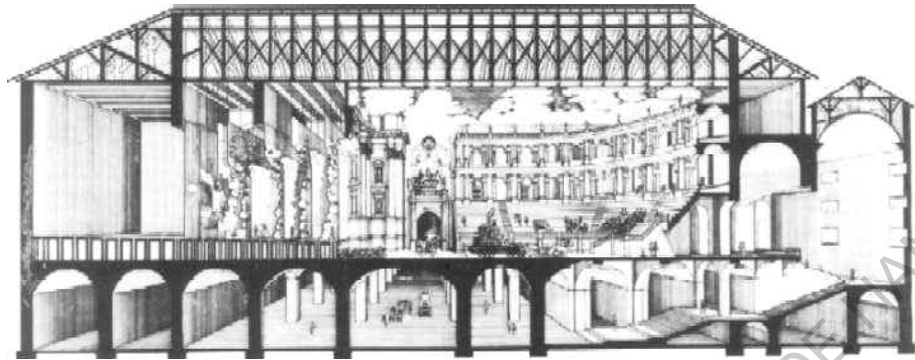
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

3. Opéras

Contrairement aux salles de concert, les salles dédiées à l'opéra ont fait l'objet de plus nombreux projets, et ont été construites en plus grand nombre. En conséquence de quoi, c'est bien parmi les architectes créateurs d'opéras que l'on trouve les projets les plus aboutis et pensés d'un point de vue acoustique. Cela est dû au fait que contrairement aux salles de concert, l'usage d'un opéra est déterminé très précisément, en accord notamment avec les compositeurs contemporains à leur construction.

La majeure partie des opéras du XVIII^e siècle a la forme d'un U ou d'un ovale tronqué, dont l'origine provient des théâtres romains. Les spectateurs font face à la scène sur le parterre, tandis que des loges se trouvent aux étages. En forme de U, on a typiquement le théâtre Farnese de Parme **Fig.4, 5, 6**, en ovale le projet du théâtre Tordinona à Rome.





5

Coupe du Teatro Farnese



6

Vue intérieure du Teatro Farnese

4. Points intéressants

a. Corrélation entre style et acoustique

Il est très intéressant de noter que l'observation de la programmation dans les salles de concert et opéras montre un véritable lien entre l'acoustique du lieu et la composition. Ainsi, pour les lieux dont le temps de réverbération est élevé, les compositions évitent les traits trop rapides qui risquent de se superposer et de manquer de clarté. À l'inverse, les salles avec un temps de réverbération plus court étaient plus à même d'accueillir des pièces faisant la place belle aux virtuoses.

Les lieux de scènes se sont souvent retrouvés être en discours continu avec les compositeurs de leur époque, influant sur leur style et étant éventuellement remodelés pour mieux plaire au compositeur qu'ils accueillait. Haydn a été obligé de changer de style selon s'il écrivait pour la salle Esterháza ou le King's Theater. Les orchestres sont également remodelés pour mieux convenir à l'acoustique de la salle. Les compositeurs sont globalement tributaires de la salle et ce jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. La fin de ce siècle marque la fin du mécénat et la création de salles publiques capables d'accueillir un public beaucoup plus nombreux.

Construit en 1854, le Crystal Palace de Paxton pouvait accueillir jusqu'à 4000 musiciens. Le soucis majeur de ce type de construction est la distance que le son parcourt sans rencontrer d'obstacles. Ces dimensions extrêmement grandes génèrent un phénomène d'écho qui n'est adapté qu'à un certain type de pièces, généralement assez lentes (musique religieuse par exemple), comme le déplora Berlioz dans ses mémoires après une série de concert au cirque des Champs Élysées:

«En outre le local, cette fois encore, ne valait rien pour la musique. Le son roulait dans cet édifice circulaire avec une lenteur désespérante, d'où résultaient, pour toutes les compositions d'un style un peu chargé de détails, les plus déplorables mélanges d'harmonies. Un seul morceau y produisit un très-grand effet, ce fut le *Dies iræ* de mon *Requiem*. La largeur de son mouvement et de ses accords le rendait moins déplacé que tout autre dans cette vaste enceinte retentissante comme une église.»

Au milieu du XIX^e siècle, le mouvement romantique mené par des compositeurs comme Brahms, Strauss, Dvořák ou Wagner se développe, et avec lui, une nouvelle typologie de salle. C'est à cette époque qu'on construit la Grosser Musikvereinsaal de Vienne. Ces salles ont la particularité d'être du modèle de type boîte à chaussure, donc rectangulaires. Ce modèle est susceptible d'accueillir jusqu'à 2000 personnes, il possède un plafond très haut (15m de haut), une faible largeur (19 à 23m). Le son produit par ce type de salle, à cause notamment de sa faible largeur, est décrit comme clair et plein. La présence de balcons accentue encore l'étroitesse de la salle et enrichit le son. Ces salles sont particulièrement adaptées à la musique de leurs contemporains. Cependant, même si cette disposition a été choisie comme modèle de l'époque, le manque de connaissance quant à la qualité absorbante des matériaux a débouché sur de nombreuses salles possédant une acoustique loin d'être satisfaisante.

Le bâtiment le plus emblématique liant acoustique de salle et style musical, reste l'opéra de Bayreuth construit par R. Wagner en 1876, pour ses œuvres, spécifiquement. Hartmut Haenchen, chef d'orchestre allemand va même plus loin, cet opéra est spécifique à une œuvre en particulier, *Parsifal*.

«L'acoustique si particulière et reconnue de Bayreuth n'est en réalité parfaitement fonctionnelle que pour *Parsifal*. C'est certainement l'une des raisons pour lesquelles Wagner utilise un style proche de la musique de chambre pour cette pièce. Pour des pièces antérieures composées pour d'autres salles, mais aussi pour le *Ring* dont les structures sont beaucoup plus denses que *Parsifal* [...] on peut se rendre compte que l'acoustique de Bayreuth brouille les éléments de contrepoint de ces pièces».

L'explosion de la taille des salles n'est pas seulement le fruit de l'imagination de certains compositeurs comme H. Berlioz ou R. Strauss. L'augmentation de la taille des salles vient aussi de la volonté des commanditaires de pouvoir accueillir un maximum de personnes

et donc de pouvoir augmenter leurs profits. Les architectes ont donc dû faire face à autant de nouveaux problèmes, comme ceux de gérer l'écoute des spectateurs situés les plus loin de la scène, et ceux malgré le fait qu'il leur manquait les notions d'acoustique afin de pouvoir satisfaire ces besoins. Il en a résulté un nombre conséquent de salles ratées.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

b. Des notions d'acoustique très basiques

Pendant les XVII^e et XVIII^e siècles, les salles ont tendances à être dessinées sous la forme d'ellipses, comme le préconisait Pierre Patte. Si celle-ci apporte une unité visuelle à la salle, elle possède aussi deux foyers où vont se concentrer les réflexions sonores au contraire d'apporter une homogénéité du son dans la salle. On pense à cette époque que la salle concave «protège» le son, tandis que les surfaces convexes le dispersent. Cette idée de construire en forme d'ellipse est d'autant plus étrange que l'analogie entre optique et acoustique est le seul modèle à disposition à l'époque et n'est ici paradoxalement pas utilisé, ou au moins incompris. On peut noter toutefois, qu'il existe cette conscience, née d'expérimentations et d'échecs, que les parois réfléchissent le son, que la géométrie influence le temps de réverbération.

L'emploi des matériaux est dicté principalement par les choix esthétiques de l'architecte, ainsi la pierre ou le bois pouvait être utilisés indifféremment, ce qui pouvait créer des désagréments acoustiques profonds. C'est comme ça que le Teatro Comunale de Bologne (1756-1763) a dû subir des modifications conséquentes après qu'il a été construit en pierre. La forme des salles et les matériaux utilisés se sont souvent inspirés des instruments de musique. On avait aussi cette idée que les lambris de bois agissaient comme des éléments résonnant à l'image d'un violon, cette hypothèse a duré jusque vers 1950. Évidemment cette idée était fausse mais elle avait l'avantage de permettre l'absorption des fréquences basses et d'améliorer la clarté de la salle.

L'architecte George Saunders a réalisé à la fin du XVIII^e siècle une série de tests qui a mené aux prérogatives suivantes quant à la conception d'une salle de concert:

- le spectateur ne doit pas se trouver à plus de 22m de la scène;
- le plafond doit être utilisé pour transmettre le son aux spectateurs les plus en hauteur;
- le plan en demi-cercle est idéal;
- tout spectateur doit avoir un lien direct avec la scène;
- le bois est un matériau absorbant.

Ces hypothèses sont toutefois sujettes à discussion notamment en ce qui la forme de la salle. Le scientifique allemand E. Chladni a écrit un livre peu après, *Die Akustik*, réutilisant les expériences de Saunders et donnant plus de détails quant à l'organisation du son. Ces propos seront résumés plus tard par Inman et Reid vers 1830:

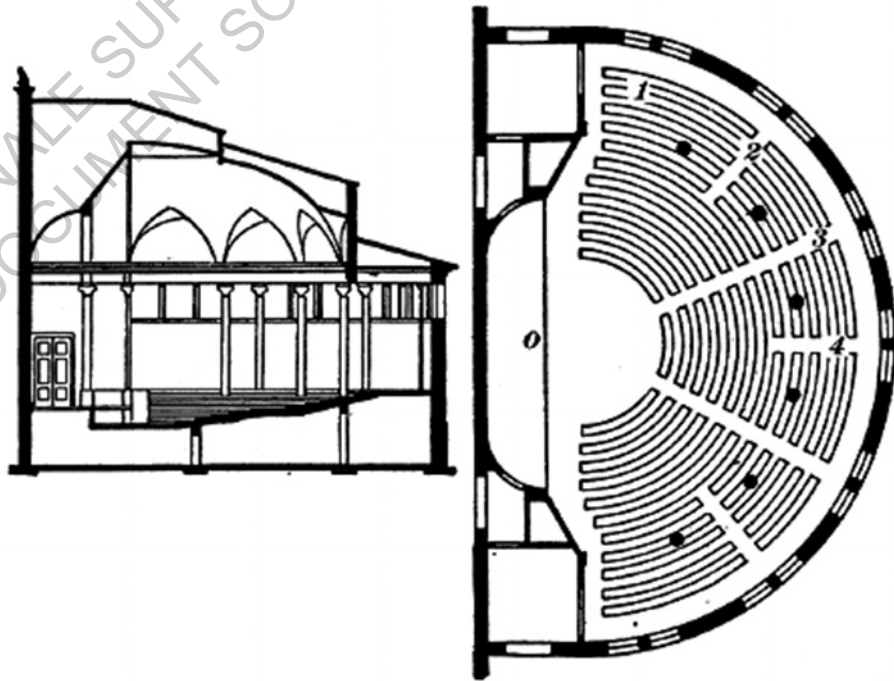
- favoriser l'accès direct au son;
- jouer sur les premières réflexions pour renforcer le son direct;
- un plafond pas trop haut ni trop voûté;
- une surface de réflexion pas trop grande;
- les sièges des spectateurs s'élèvent progressivement (lié à la directivité du son).

Reid continua d'expérimenter dans de nombreuses salles, au Louvre notamment, des procédés supposés améliorer l'acoustique des salles. Il découvrit nombre de principes qualitatifs concernant l'usage des matériaux, la qualité absorbante du public, la hauteur des plafonds et leur forme. Ces résultats restèrent néanmoins qualitatifs et pas quantitatifs, empêchant l'acoustique des salles de se baser sur de véritables résultats scientifiques. Ceci n'est pas vraiment dû au manque d'inventivité de Reid, mais plus au manque de moyens techniques pour mener cette étude. A titre d'information, on ne connaît que depuis 1816, grâce à Laplace, une théorie amenant à une bonne approximation de la vitesse du son dans n'importe quel milieu.

B. Une approche scientifique

1. W. C. Sabine (1868-1919)

Wallace Clement Sabine est considéré comme le père de l'acoustique de salle. Il a transformé l'acoustique de salle telle qu'elle était avec Reid, c'est-à-dire des consignes basées sur des observations empiriques peu précises, en véritable science, née d'un protocole expérimental précis. Sabine n'est au départ pas un spécialiste du son quand on lui demande de se pencher en 1895 sur les problèmes d'acoustique du Fogg Art Center **Fig.7** de l'université de Harvard. Il travaille à Harvard en tant que physicien et conférencier. Cet auditorium avait été construit sur la base d'un amphithéâtre antique en plein air, sans prendre en compte les réflexions dues aux parois et au plafond. Le résultat de cette construction en fût un espace avec une intelligibilité calamiteuse. Sabine, en bon physicien ne va pas se contenter de trouver des mesures palliatives, mais va chercher une méthode applicable à tous les espaces.



2. État de l'art avant Sabine

Lorsque Sabine est mandé pour améliorer le Fogg Center Auditorium, il lit d'abord toute la littérature scientifique à sa disposition concernant l'acoustique de salle. Celle-ci, comme nous l'avons vu dans la partie précédente est assez maigre. Les précédents scientifiques se limitent globalement à *De Architectura* de Vitruve en 530 av. J.-C., Kircher en 1650 puis Russell en 1838. Cependant, il s'agit d'acoustique géométrique où l'on trace les rayons de la voix, comme on tracerait des rayons lumineux. Chez Vitruve, on trouve cependant la trace de résonateurs de Helmholtz sous la forme de vases qui devaient renforcer la voix par résonance. Kircher a montré comment un amphithéâtre en forme d'ellipse focalisait le son en deux points tandis que Russell a développé les courbes dites isoacoustiques où l'on reçoit du son direct tout en aillant une vision optimale.

Les physiciens du XVIII^e siècle se sont plus intéressés à la nature du son, qu'à l'acoustique de salle. Ainsi, diverses expériences se succèdent pour montrer que le son est une onde mécanique (elle a besoin d'un milieu pour se propager) longitudinale dont la vitesse varie en fonction des caractéristiques du milieu (isotropie, température, hygrométrie, ...). Bernoulli et Fourier montrent qu'une onde complexe est une superposition d'ondes simples (d'où le timbre et les harmoniques). Euler, d'Alembert et Lagrange formalise la théorie de propagation des ondes, tandis que Helmholtz montre expérimentalement l'existence des harmoniques. Laplace a également réussi à obtenir une valeur de la vitesse du son valable.

D'un point de vue technique, Sabine dispose d'un chronomètre précis au centième de seconde et d'un orgue pour faire la synthèse de ces connaissances et proposer un outil scientifique qui puisse prévoir l'acoustique d'une salle.

3. L'expérience

Pour trouver cette formule, Sabine réalisa des centaines d'expériences dans une dizaine de salles. L'expérience consistait à relever le temps qu'un son mettait à disparaître (temps de réverbération) en fonction du nombre de coussins que l'on mettait sur les chaises. Il finit par en déduire la formule qui le rendit célèbre.

Formule de Sabine

$$TR = 0,16 \frac{V}{A}$$

↑
temps de réverbération (en s)

←
volume (en m³)

←
aire équivalente absorption (en m²)

Sabine appliqua cette formule pour concevoir le Symphonic Hall de Boston dont l'acoustique est louée encore aujourd'hui.

Cependant, même si cette formule a donné aux concepteurs de salle un outil très puissant qui leur a permis d'anticiper le temps de réverbération d'une salle, elle ne résout pas tous les problèmes. Si jusque dans les années 1930 et 1940, elle a suffi, avec l'acoustique géométrique, à l'obtention de salles de qualité, à partir des années 1950, les architectes sont de plus en plus ambitieux et les formes se font de plus en plus complexes, ce qui remet en cause l'acoustique classique d'alors. On revient à des notions d'acoustique très subjectives. L'étude d'une salle complexe à partir de ces années a grandement reposé sur la réalisation de maquettes 1/10e, et l'observation de la propagation du son dans celles-ci.

C. Espaces contemporains à l'IRCAM

1. Un désir d'expérimenter

a. Le Philharmonie de Berlin

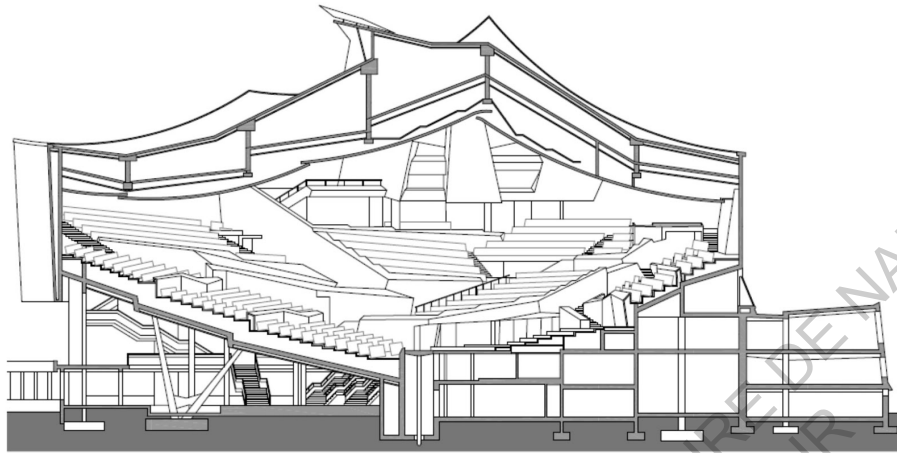
La salle du Philharmonie de Berlin **Fig.8, 9, 10** réalisé par Hans Scharoun entre 1960 et 1963 est un bel exemple de cette volonté d'expérimenter, de créer une nouvelle relation entre le public et les musiciens. Cette salle est la première à présenter une scène centrale, entourée de toute part par les spectateurs. Il comprend 2218 sièges dont les plus éloignés se trouvent à peu près à 35m. On a malgré tout une certaine proximité entre public et orchestre.

Le problème que pose ce type d'organisation est que les spectateurs situés derrière l'orchestre ne bénéficient pas du son direct des instruments très directs que sont les instruments à vents.



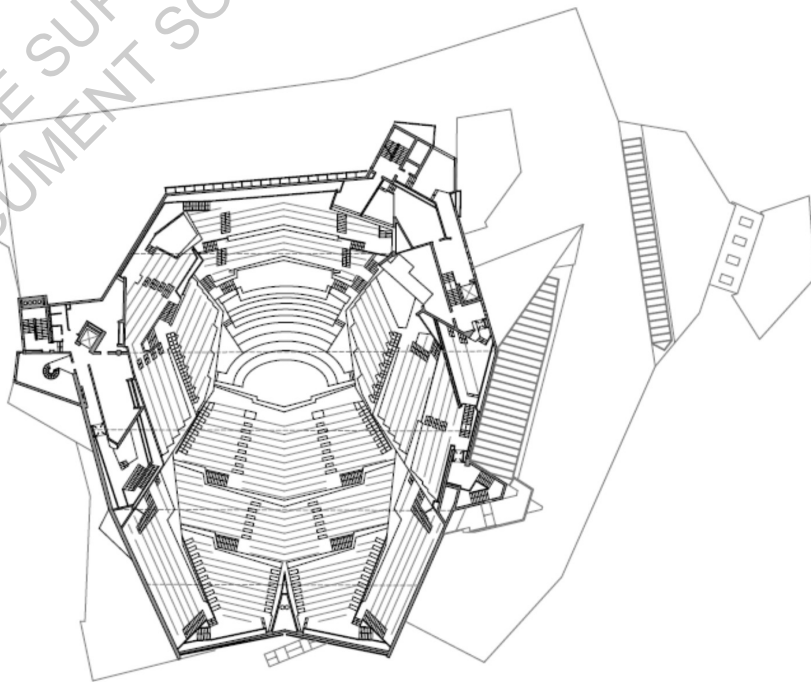
8

Vue intérieure de la salle du Philharmonie de Berlin.



9

Coupe du Philharmonie de Berlin.



10

Plan du Philharmonie de Berlin.

b. Expériences de Stockhausen

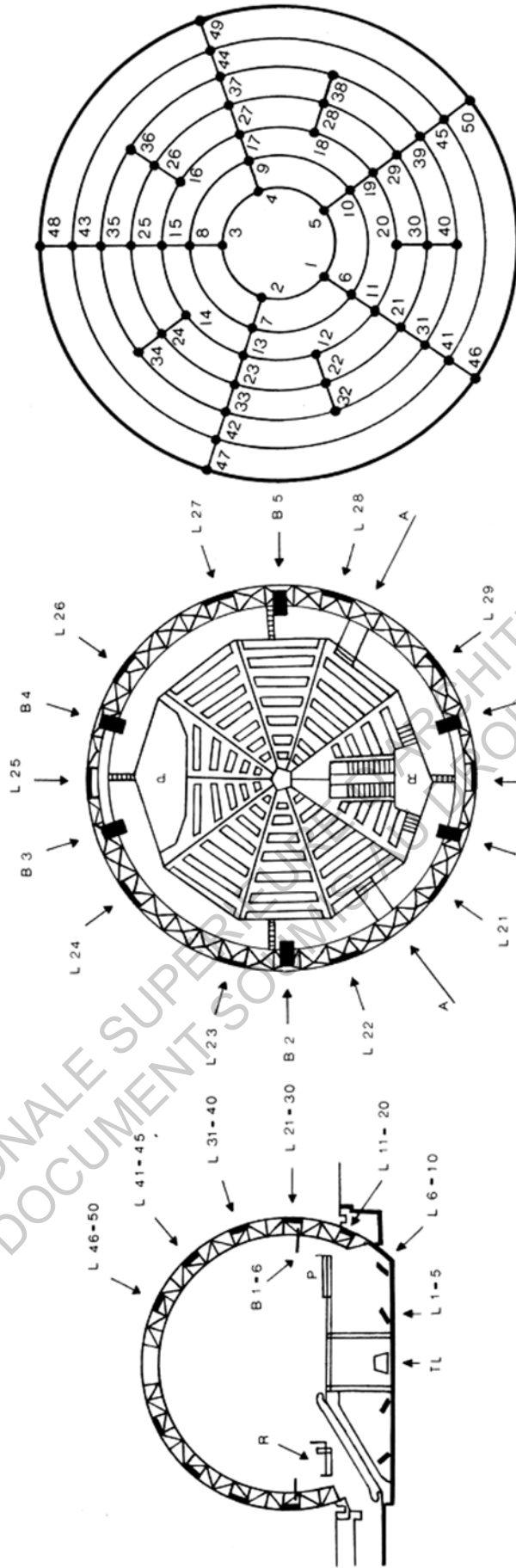
Stockhausen va plus loin lorsqu'il s'agit de renouveler la relation entre le public et la musique. Il écrit et réalise en compagnie d'autres compositeurs et musiciens, *Musik für ein Haus* en 1968. Le principe de cette pièce consistait à répartir une quinzaine d'instrumentistes dans une maison, séparés les uns des autres, ne pouvant donc s'écouter mutuellement, et jouant une des compositions proposées par un des compositeurs. Les spectateurs avaient le loisir de passer de pièce en pièce pour observer ce qui se passait. Une seule pièce, la pièce de mixage réunissait tous les sons produits par les instrumentistes.

À Osaka, en 1970, il cherche à créer un mouvement sonore en tapissant l'intérieur d'une sphère de haut-parleurs, le son suivant diverses trajectoires. **Fig.11, 12**



11

Vue intérieur du Pavillon allemand d'Osaka.



OSAKA-AUDITORIUM

QUERSCHNITT

TL = Tiefen-Lautsprecher

DRAUFSICHT auf die Publikums-Plattform mit den zentral angeordneten Kissenbänken.

A = Ausgang

L = Lautsprecher

B = Solistenbalkone

P = Musikerpodium (ca. 25 cm hoch)

R = Regiepult; vor dem Regiepult die doppelte Rolltreppe für das hereinkommende Publikum. (Einlaß alle 15 bis 35 Minuten, je nach Werk oder Teil eines Werkes; jede Aufführung wurde in Englisch und Japanisch angesagt; während einer Aufführung war das Auditorium abgedunkelt, und einzelne Spot-Lampen waren auf die Solisten gerichtet.)

LAUTSPRECHERVERTEILUNG

Lautsprecher L 1-5 tiefster Kreis unterhalb des Publikums.

L 46-50 höchster Kreis im Zenit der Kuppel.

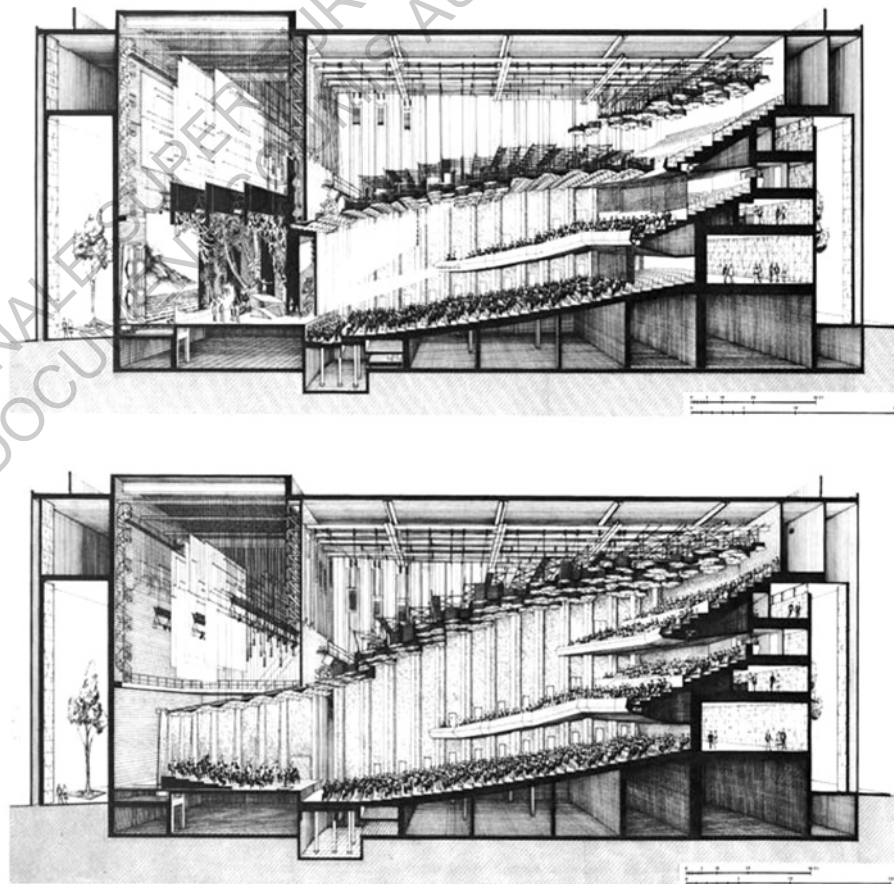
Das Regiepult befand sich bei L 30 oberhalb der Rolltreppe.

2. Acoustique variable: pourquoi?

Une acoustique variable est une solution qui peut arranger bien des maîtres d'ouvrage qui voient une opportunité de réduire les coûts. Par exemple, plutôt que de posséder une salle de concert et une salle de théâtre une ville pourrait posséder une salle unique qui ferait salle de concert et salle de théâtre alors que les conditions pour un temps de réverbération adéquat est très différent dans les deux situations. Il ne faut pas non plus se permettre une acoustique décevante pour l'un des cas, non, il faut une acoustique de qualité partout, autrement il n'y a plus d'intérêt à aller dans ces salles, la qualité des enregistrements en studio est maintenant telle que si la qualité d'une salle est trop faible qu'on pourrait aussi bien rester chez soi. Glenn Gould ne travaille aujourd'hui plus qu'en studio.

Pour une salle de concert, c'est un moyen de pouvoir accueillir une programmation plus variée, voir de stimuler la créativité des artistes qui pourraient potentiellement y jouer: c'est exactement le cas de l'*Espace de projection*. Couplé à une explosion des genres musicaux, classique, jazz et à une demande de services de plus en plus variés, les salles sont tombées dans l'obligation d'accueillir une quantité très vaste d'évènements avec des demandes acoustiques et spatiales très différentes. L'idée d'avoir une salle modulable, avec une acoustique variable a donc germé et a pris diverses formes. On peut jouer sur l'acoustique passive par déplacement du plafond ou modification des parois ou sur l'acoustique active par installation d'un système électroacoustique (haut-parleurs). De nombreuses salles ont bénéficié dans les années 1960 d'une acoustique variable passive, notamment par l'installation d'un plafond amovible pour une sous-utilisation. L'acoustique active a elle souvent été repoussée pour des raisons d'égo.

Aujourd'hui, il existe deux solutions pour changer l'acoustique d'une salle, soit de façon active, soit de façon passive.



13 Jesse H. Jones' Hall for the performing arts. Deux configurations de salle.

3. Acoustique passive
 - a. Le modèle de l'Espro

Pour faire varier le temps de réverbération d'une salle, la première solution évidente est de pouvoir changer la géométrie et les matériaux des parois. L'exemple typique d'une telle salle est évidemment l'*Espace de projection*. Cependant, comme on l'a vu, l'usage de ces panneaux est effectivement limité aujourd'hui. L'usage même des panneaux pendant un spectacle est rendu difficile par le bruit de la machinerie.

En plus de ce bruit, ce type d'installation, même s'il paraît accessible n'est réalisable que pour des bâtiments neufs, et son entretien nécessite un personnel formé, ce qui le rend très coûteux.

On trouve un autre exemple de ce type d'installation **Fig.9** en Belgique qui date de 1938 à Bruxelles, à la Maison de la Radio, le temps de réverbération peut varier de 1,2s à 2,2s. Sa variabilité est donc moindre par rapport à celle de l'*Espace de projection*, néanmoins, ce type de technologie était déjà éprouvé lorsqu'on a décidé de l'utiliser pour l'IRCAM. Les studios de Radio France ont bénéficié d'une technologie similaire.

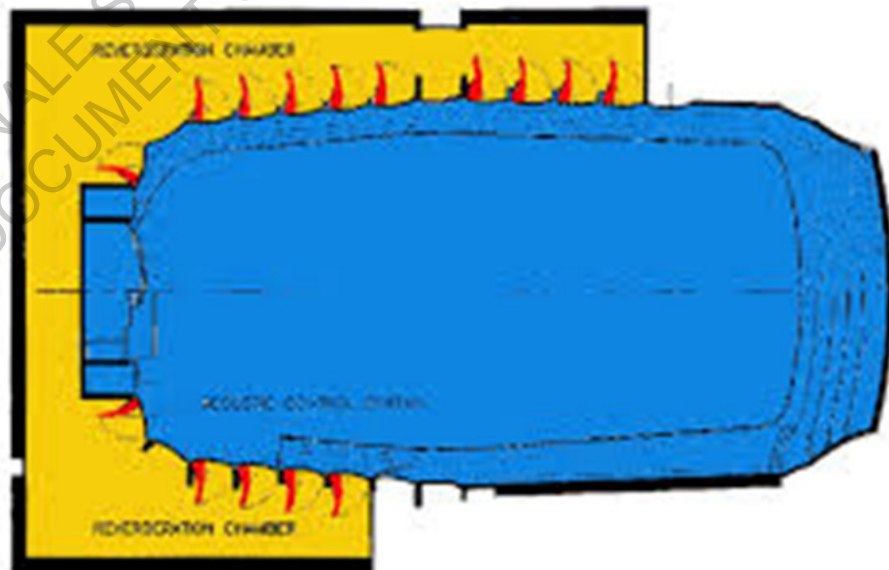


b. Espaces couplés

Sans avoir la souplesse que possède l'*Espace de projection*, le KKL de Lucerne **Fig.10** en Suisse, comme d'autres salles a la possibilité de faire varier son temps de réverbération par la méthode des espaces couplés. Les espaces couplés sont une technique qui consiste à construire un espace secondaire derrière un espace principal. Le temps de réverbération de l'espace secondaire est plus long que celui de l'espace principal, il retransmet alors une partie de son énergie à l'espace principal. Le KKL **Fig.15** peut gérer les ouvertures entre la salle principale et la salle secondaire pour faire varier le temps de réverbération.

Au Philharmonie, il y a également des espaces couplés, mais fixes, cependant, il existe un plafond amovible, et donc un moyen de faire varier l'acoustique par changement de volume.

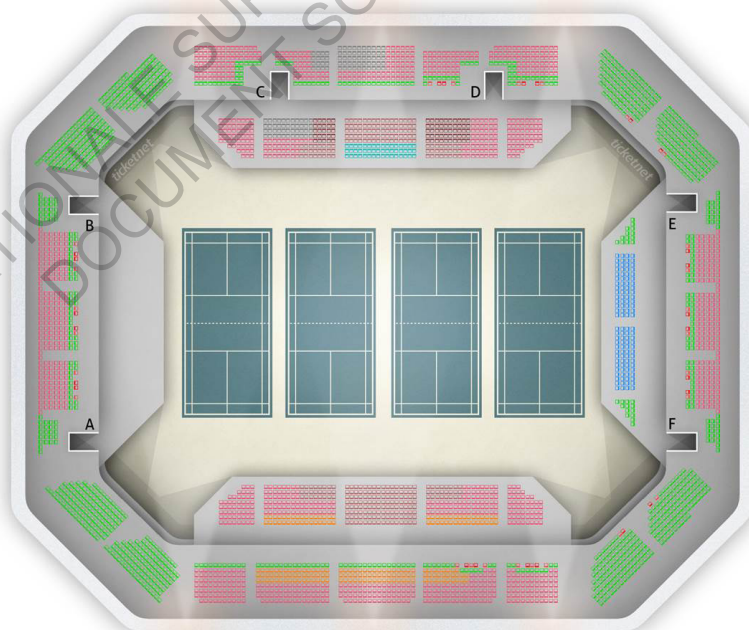
Cette solution est aujourd'hui de plus en plus utilisée pour les salles dont le volume est conséquent.





16

Vue intérieure du KKL de Lucerne



CARRE OR CAT1 CAT2 PMR PMR ACC

17

Plan d'organisation du Vendespace pour un évènement de badminton

4. Acoustique active

L'acoustique active est la deuxième solution. Elle fait appel à l'électroacoustique, et donc à tous les systèmes d'amplification, comme le WFS ou autre. Comme on le verra plus bas avec l'exemple de l'*Espace de projection*, l'installation de tels systèmes permet des performances nouvelles. C'est aussi un moyen d'améliorer l'acoustique d'une salle dont la réverbération est insuffisante, si elle l'est trop, ce système ne sert malheureusement à rien, il ne peut qu'ajouter de l'énergie. Concernant l'acoustique de la salle d'origine, s'il y a moyen de l'améliorer, cette méthode n'est pas non plus un remède miracle, une salle médiocre le restera.

Parmi ces salles, on peut notamment trouver la salle du Vendespace **Fig.11** où un système électroacoustique a été mis en place pour créer des parois virtuelles.



D. Petite synthèse

L'IRCAM ouvre en 1977, à un moment où comme on l'a vu, les architectes ont commencé à expérimenter formellement sur les salles de concert. Si l'on a dépassé Vitruve et la simple acoustique géométrique, les connaissances en terme d'acoustique des salles restent limitées et du point de vue de la recherche musicale, on arrive à un point charnière où le rapport à l'espace scénique et acoustique est constamment remis en cause. La direction architecturale que pourrait prendre ce lieu est donc assez floue.

Il existe cependant quelques certitudes, alors que jusqu'au XIX^e siècle, les compositeurs et musiciens ont subi les lois acoustiques des lieux dans lesquels on leur proposait de jouer. Les styles musicaux ont donc été fortement influencés par les lieux dans lesquels on les jouait. Un son très clair et pur a donné naissance au classicisme, les salles possédant une certaine réverbération et un son riche ont favorisé le romantisme. La révolution industrielle a amené la possibilité de créer des espaces clos gigantesques qui ont inspiré des compositeurs tel Berlioz, le développement de composants électroniques a considérablement influencé Stockhausen et Xénakis dans leur travail. Les compositeurs vivent avec leur temps et ne subissent pas que l'acoustique du lieu (salles), mais aussi les éléments techniques liés à la production de son (instruments de musique, matériel de MAO).

À partir du XX^e siècle, on s'émancipe des salles et celles-ci passent au service du compositeur, et non l'inverse. La tendance a été de pouvoir jouer dans une salle n'importe quel type de musique, aussi comme vu plus haut, s'est développée l'idée de la salle à acoustique variable.

L'*Espace de projection* possède cette particularité qu'elle n'est pas seulement un réceptacle pour une musique déjà existante, mais

surtout un catalyseur de musique potentielle. La question est donc de savoir comment l'*Espace de projection* s'est proposée d'allier grande variabilité et contrainte inspirante.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

A. Une initiative de Pierre Boulez: l'IRCAM

L'institut de recherche et coordination acoustique/musique (IRCAM) est fondée par Pierre Boulez en 1970. Toutefois, le bâtiment dédié à l'IRCAM, conçu par Renzo Piano et Richard Rogers en face du Centre Georges Pompidou, n'ouvre qu'en 1977. Cet institut avait pour but de favoriser les échanges entre scientifiques et compositeurs afin de stimuler l'évolution de la musique contemporaine. Si au départ l'IRCAM dépend du Centre Pompidou, elle acquiert assez vite un statut indépendant et est placée sous la tutelle du ministère de la Culture et non sous la direction de la musique dirigée par Marcel Landowski avec qui Boulez est en total décalage sur l'orientation que doit prendre la musique contemporaine. L'IRCAM dont l'objectif a été défini par Pierre Boulez:

«L'intuition du créateur à elle seule est impuissante à opérer la translation totale de l'invention musicale. Il faut donc avoir recours à la collaboration du chercheur scientifique pour envisager l'avenir à plus longue échéance, imaginer des solutions moins personnellement délimitées. [...] Ce qu'il faut, c'est que les musiciens intériorisent un certain savoir scientifique comme partie intégrante de leur imagination créatrice. Quant au scientifique, on ne lui demande évidemment pas de composer, mais de concevoir exactement ce que le compositeur ou l'instrumentiste attendent de lui, de comprendre les directions prises par le monde de la musique aujourd'hui et d'orienter son imagination en ce sens.»

a pour but de créer un modèle de création musicale contemporaine et de diffuser ce modèle en France tout en sensibilisant la population à ce genre de musique. Il s'agit d'ouvrir ce monde secret, étrange de la musique contemporaine à tous. Cette sensibilisation passe par l'organisation de stage, d'événements, de concerts via deux outils principaux: le bâtiment de l'IRCAM et l'*Espace de projection*. L'IRCAM prend une place centrale dans la musique contemporaine, à cause de son emplacement dans le centre de Paris, et est considérée comme le modèle à suivre pour les autres centres de création musicale. L'IRCAM prend néanmoins une place si centrale, à l'image du Centre Beaubourg, qu'elle laisse peu de marge de manœuvre aux

autres centres. Un autre souci étant la concentration des moyens financiers sur l'IRCAM à défaut des autres centres, ce qui crée un fossé entre l'IRCAM et les autres institutions. Le manque de clarté dans la définition des missions de l'IRCAM lors de sa première mise en service a résulté dans des difficultés administratives internes et donc dans une inertie de l'institut. Après diverses réformes, l'IRCAM a finalement opté pour une division en deux pôles, l'un scientifique, l'autre musical. Cette organisation s'est complexifiée avec les années afin de répondre aux missions et besoins de la musique contemporaine.

Aujourd'hui, les politiques successives auxquelles a été soumis l'IRCAM ont cependant tendu à diminuer ce fossé (notamment en 1983), forçant l'IRCAM à chercher des financements extérieurs, tout en gardant un contrôle sur celui-ci, après lui avoir laissé carte blanche. Le manque de visibilité de l'institut a été quelque peu résolu au cours des années, mais on peut se demander comment se comportera l'IRCAM après la mort de Pierre Boulez en janvier 2016. Les missions de l'IRCAM sont réévaluées régulièrement afin de ne pas rester en marge de la technologie, comme avaient pu le reprocher Xenakis et Eloy. On peut également la dimension internationale du centre qui accueille des compositeurs de tous horizons et les partenariats avec Stanford ou le MIT entre autres. Malgré ces efforts, on peut toujours reprocher un manque de visibilité à l'IRCAM et un public de la musique contemporaine assez restreint. On notera le rôle éminemment politique joué par l'*Espace de projection* et l'IRCAM en général.

B. Rudiments d'acoustique

1. Introduction

Pour pouvoir comprendre un objet acoustique tel que l'*Espace de projection*, il est nécessaire de posséder des notions d'acoustique basiques. Nous avons vu plus haut que l'on pouvait adopter deux types d'approche en acoustique, une approche plus expérimentale et plus statistique comme l'a fait Sabine, et une approche plus théorique bien que basée sur des observations physiques qui traite du son comme une onde mécanique. Il ne s'agit certainement pas de s'intéresser à l'obtention de tel ou tel timbre à n'importe quel endroit de la salle car il faudrait alors ne pas simplement se limiter à une approche de physicien, mais se créer aussi une culture mathématique qui requiert une certaine exigence qui n'a pas lieu d'être ici. Non, nous nous limiterons à l'obtention de l'équation de propagation d'une onde moyennant certaines conditions, et en présupposant une connaissance de certains codes mathématiques, cette partie a surtout vocation à expliciter un vocabulaire de base. Nous traiterons ensuite de l'approche de Sabine, de ses limites et de surtout de ses conditions. Une onde sonore est une onde mécanique, elle a donc besoin d'un milieu matériel pour se propager (contrairement à la lumière). Ceci a été démontré en 1672 par Otto Van Guericke. Le son peut donc se déplacer dans des fluides, comme l'air ou l'eau par exemple, or ce sont des matériaux élastiques, leur volume et masse volumique peuvent donc varier. C'est cette modification de volume qui entraîne une modification de pression qui permet la mise en mouvement des particules de fluide voisines. Cette mise en mouvement entraîne une modification du volume, puis de la pression et ainsi de suite. Ces variations sont responsables de la génération d'une onde sonore. Le son dépend donc du milieu dans lequel il se propage, soit par exemple, de la température, du degré d'hygrométrie.

2. Formule de Sabine

Une fois que le son est coupé, il continue à exister par le phénomène de réverbération. Sabine trouva une formule permettant de prédire ce temps. Néanmoins, elle nécessite certaines approximations, dont celle de considérer que le champ acoustique est identique en chaque point de l'espace de la salle, c'est l'hypothèse des champs diffus. On considère donc e_r , la densité d'énergie réverbérée (J.m^{-3}). La variation de l'énergie totale dans la salle s'écrit comme suit:

$$\frac{dE_r}{dt} = \frac{de_r}{dt} V \quad \text{où } V \text{ est le volume de la salle}$$

La fraction d'énergie réverbérée absorbée par unité de temps vaut $\frac{cAe_r}{4}$. (la démonstration sera donnée en annexe) On en déduit une équation différentielle du premier ordre sans second membre:

$$\frac{dE_r}{dt} = V \frac{de_r}{dt} = -\frac{cAe_r}{4}$$

Cette équation est facilement résolue par séparation des variables, on en déduit l'expression de $e_r(t)$:

$$e_r(t) = e_{r0} e^{-\frac{cA}{4V}t}$$

où A la surface d'absorption de la salle

c la vitesse de propagation de l'onde

e_{r0} la densité d'énergie à $t=0$

Le temps T_{R60} , de réverbération communément cherché correspond à la valeur t pour laquelle la densité d'énergie a perdu 60 dB par rapport à $t=0$.

L'intensité d'une onde s'écrit comme: $I(t) = 10 \log\left(\frac{e_r(t)}{e_{ref}}\right)$, en déduit que:

$$I(t=0) - I(t=T_R) = 10 \log\left(e^{-\frac{cA}{4V}T_R}\right) = -60 \text{ dB} .$$

$$\text{d'où } T_R = -\tau \ln(10^{-6}) \text{ avec } \tau = \frac{4V}{cA} .$$

on obtient la formule de Sabine pour $c=343\text{m.s}^{-1}$:

$$T_R = \frac{0.16V}{A}$$

3. Formule d'Eyring

Eyring proposa quelques années après Sabine, en 1930 une autre méthode d'estimation du temps de réverbération. Les approximations sont les mêmes que celles de Sabine, soit un champ diffus et des parois homogènes. Pour déterminer le temps de réverbération, on suit la trajectoire d'un rayon. On considère donc E_{inc} l'énergie de l'onde incidente et E_{abs} l'énergie absorbée. On définit α_E , coefficient d'absorption: $\alpha_E = \frac{E_{\text{abs}}}{E_{\text{inc}}}$.

Soit I_0 , l'énergie du rayon avant sa première réflexion et $E I_0$. L'énergie après rebond vaut donc:

$$I_1 = I_0 - \alpha_E I_0 = I_0(1 - \alpha_E).$$

On peut en déduire une expression de I_n : $I_n = I_0(1 - \alpha_E)^n$ où n est un entier. On peut en déduire T_R , sachant que l'intensité initiale doit perdre 60 dB, on a:

$$10 \log\left(\frac{I_n}{I_0}\right) = 10 \log((1 - \alpha_E)^n) = 10n \log(1 - \alpha_E) = -60 \text{ dB}$$

$$\text{d'où } n = -\frac{6 \ln(10)}{\ln(1 - \alpha_E)}$$

On a n le nombre de réflexions, l la distance moyenne entre deux réflexions et c la vitesse de propagation de l'onde on peut donc en déduire une expression de T_R en fonction de ces deux constantes et de n :

$$T_R = \frac{nl}{c}$$

$$\text{où } l = \frac{4V}{S}$$

On en déduit une expression de T_R :

$$T_R = -\frac{24V \ln(10)}{cS \ln(1 - \alpha_E)}$$

$$T_R = \frac{0,16V}{-cS \ln(1 - \alpha_E)}$$

Cette formule est en accord avec la formule de Sabine pour le cas où α est faible.

4. Que dire de ces modèles acoustiques?

Ces modèles acoustiques ont pu présenter à l'époque de leur développement un outil extrêmement pratique en terme de prévision du temps de réverbération, et continuent de s'utiliser aujourd'hui, car ils demeurent assez robustes, malgré les hypothèses sur lesquels ils se basent (ie: on ne prend en compte que l'absorption moyenne, hypothèse des champs diffus, la géométrie du lieu est ignorée).

Ils sont cependant sujets à de nombreuses limitations liées à leur approche statistique, la méthode de Sabine ne s'applique bien que pour des salles à peu près rectangulaires par exemple, modèle de la "shoe box". Aujourd'hui, pour étudier une salle, on utilise diverses méthodes qui font appel au numérique, et notamment à des logiciels de modélisation tels Odéon ou CATT-Acoustic. Grâce à ces logiciels, on peut se permettre diverses approches: par éléments finis ou par une approche géométrique. Une autre approche consiste à l'exécution d'une maquette et la reconstitution des conditions d'usage dans celle-ci, mais cette solution déjà ancienne nécessite des moyens assez coûteux qui la rendent de plus en plus obsolète. Lors de la conception de l'*Espace de projection*, il va de soi que les méthodes numériques n'étaient pas disponibles. L'*Espace de projection* a eu pour but de développer des modèles à partir desquels on pourrait prévoir l'acoustique d'une salle.

C. L'Espace de projection: un outil musical

1. Le bâtiment de l'IRCAM

Le bâtiment de l'IRCAM a été réalisé en 1977 par Renzo Piano et Richard Rogers en face du Centre Beaubourg sur la place Igor Stravinsky. Ce bâtiment était au départ complètement enterré pour des raisons acoustiques, mais il a également été agrandi plus tard, en 1989, afin de répondre à un manque d'espace, et pouvoir accueillir l'administration et des bureaux. L'extension a pris la forme d'une tour de six étages dont les murs sont couverts par des panneaux de terre cuite. Parmi les salles remarquables de l'IRCAM, on note donc une salle anéchoïque et l'*Espace de projection*.



2. L'Espace de projection

L'*Espace de projection* ou *Espro* fait partie intégrante de l'IRCAM, en tant que salle de concert principalement, mais aussi d'accueil d'événements autres, comme des colloques, des activités d'éveil, par exemple. Cette salle devait répondre aux exigences définies par Pierre Boulez concernant notamment l'échange entre musiciens et scientifiques. Elle devait donc répondre en termes acoustiques à une exigence digne du plus prestigieux institut de France, mais elle devait aussi jouer un rôle de catalyseur pour les compositeurs de l'IRCAM, en les encourageant à produire de l'inédit dans un lieu inédit. Cette salle est donc certes une salle de concert, mais surtout un lieu d'expérience que l'on a choisi extrêmement souple et modulable. Cette incroyable souplesse a pris la forme de périactes et d'un plafond en trois parties. Les périactes et le plafond propose un système d'acoustique variable dite passive. L'acoustique de la salle a été réalisée par l'agence Peutz.



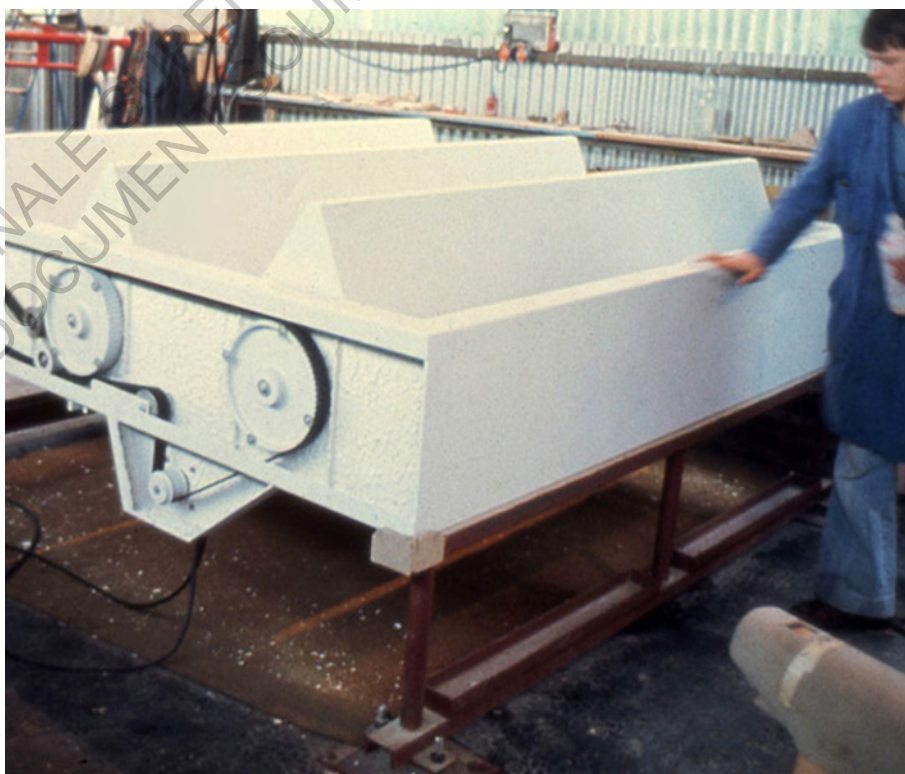


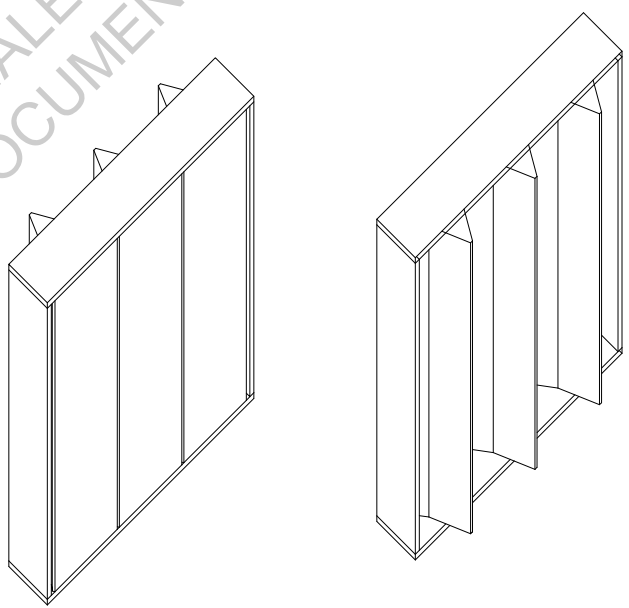
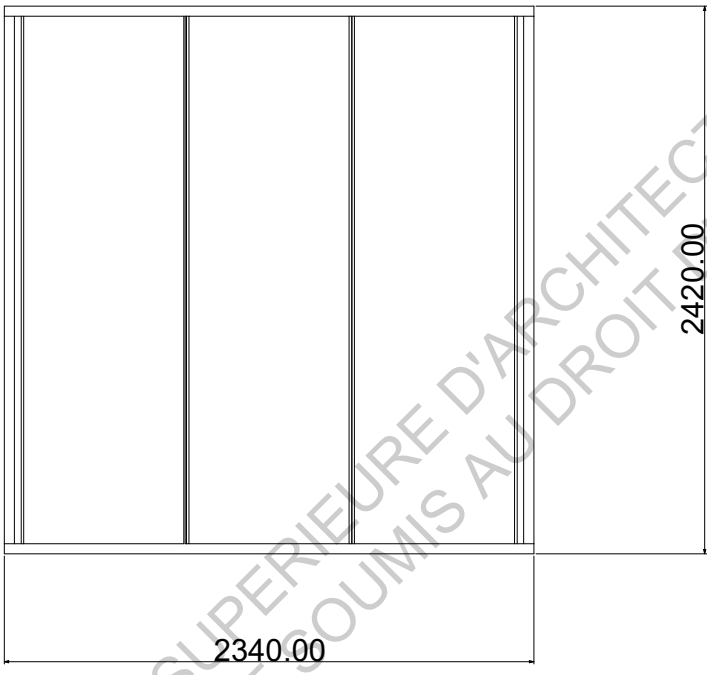
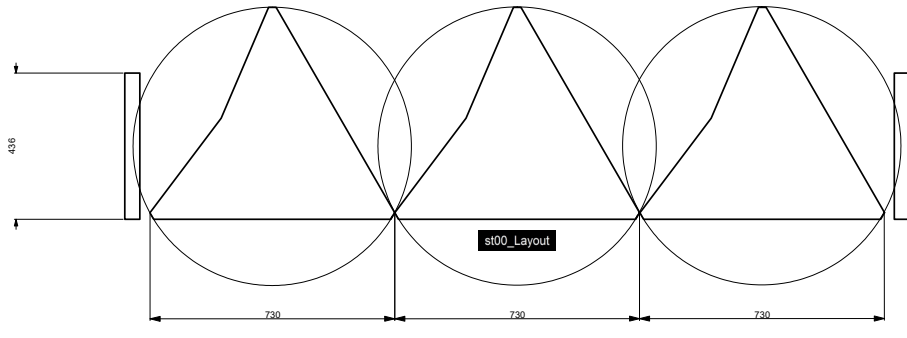
3. Les périactes

a. Descriptif

Les murs de l'*Espace de projection* sont composés de périactes, prismes à 3 côtés dont la surface diffère à chaque fois. On trouve ainsi une surface très absorbante, une surface de réflexion spéculaire et enfin une surface diffusante. La moitié des prismes diffusant absorbe les fréquences basses, tandis que l'autre moitié absorbe les fréquences hautes. Les périactes fonctionnent par 3 et sont au nombre total de 171.

Selon les positions des périactes, on a sept situations principales, dont 3 situations principales. Si les prismes sont orientés avec leur face absorbante du côté de la salle on a une situation absorbante, de réflexion spéculaire si les prismes sont orientés avec leur face réflexion spéculaire et diffusante en orientant les face diffusantes vers la salle. Les situations intermédiaires sont celles où les prismes font une saillie de 60° dans la salle. Si la salle est pleine, ces différences de situation deviennent plus marginales.





ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

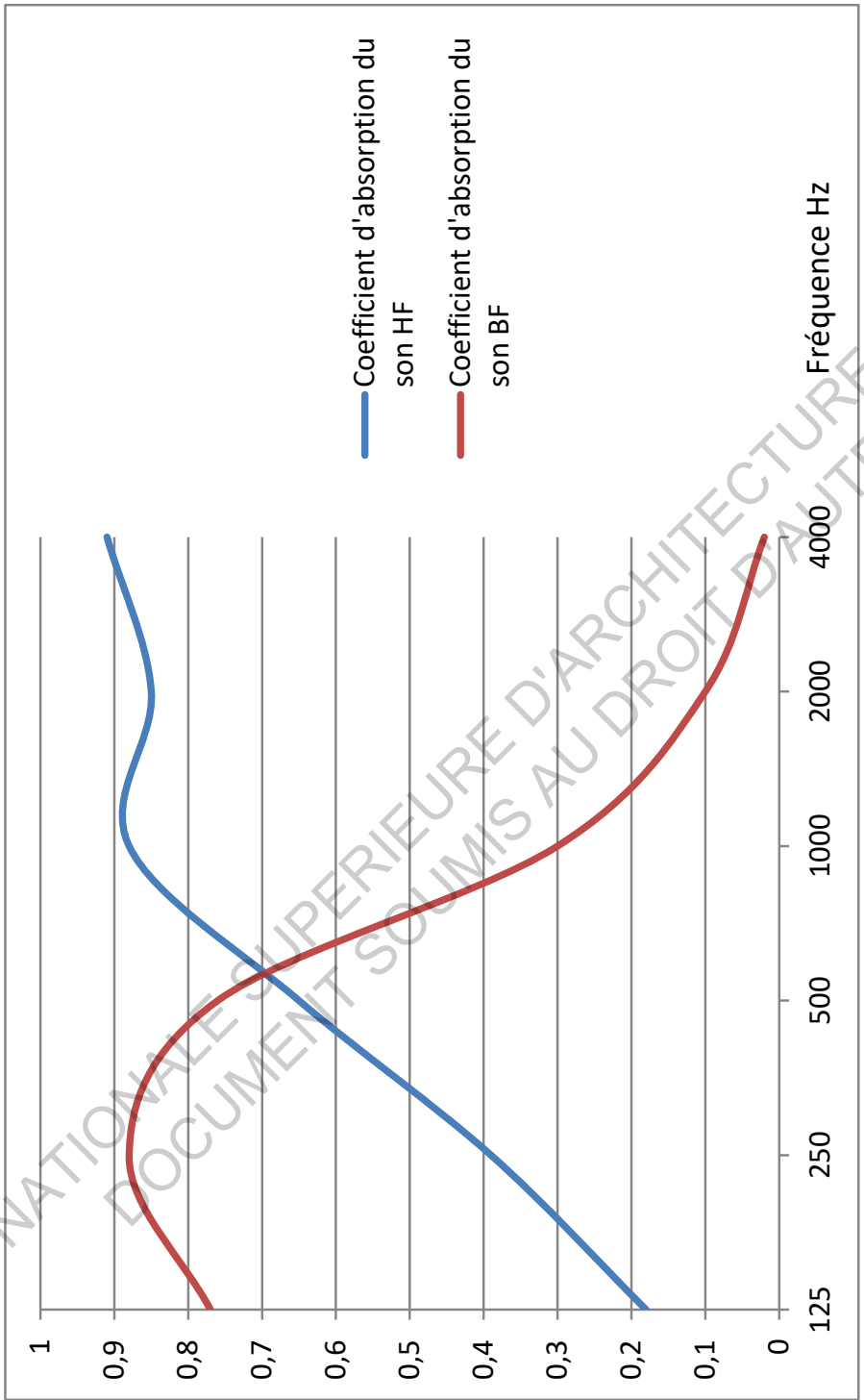
b. Influence de la position des périactes

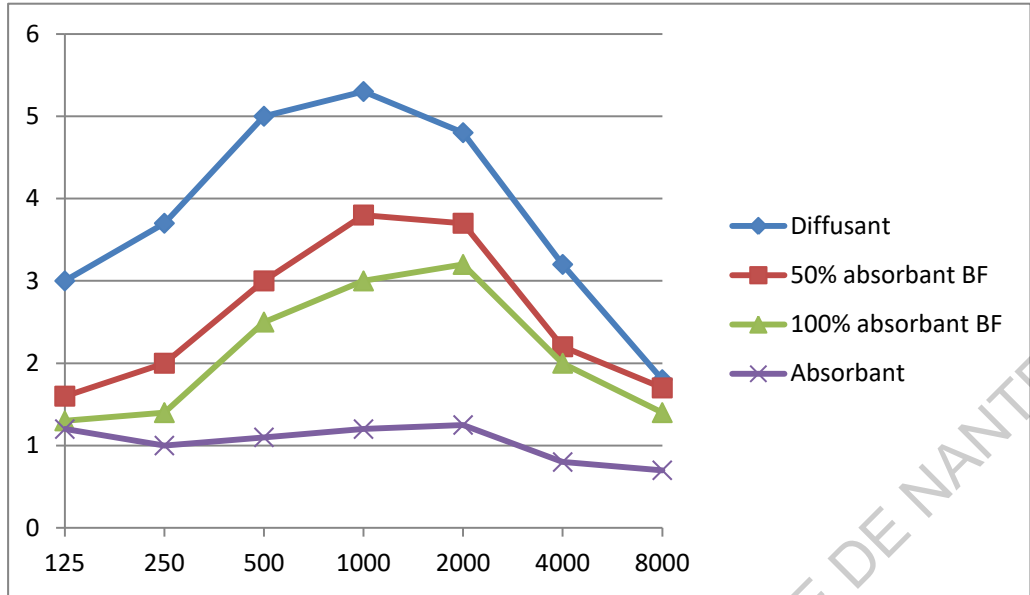
Des tests ont été réalisés pour mesurer l'influence que peuvent avoir les périactes par rapport au temps de réverbération en fonction de la fréquence.

On peut observer un pic vers 250 Hz (la sous la clé de sol) pour le matériau absorbant, avant de voir son coefficient chuter très rapidement, au contraire, le matériau absorbant haute fréquence est plus efficace à partir de 500-600 Hz, comparé au matériau absorbant basse fréquence. Associés, on peut potentiellement créer n'importe quel type de filtre, et donc largement influencer sur le timbre de la salle.

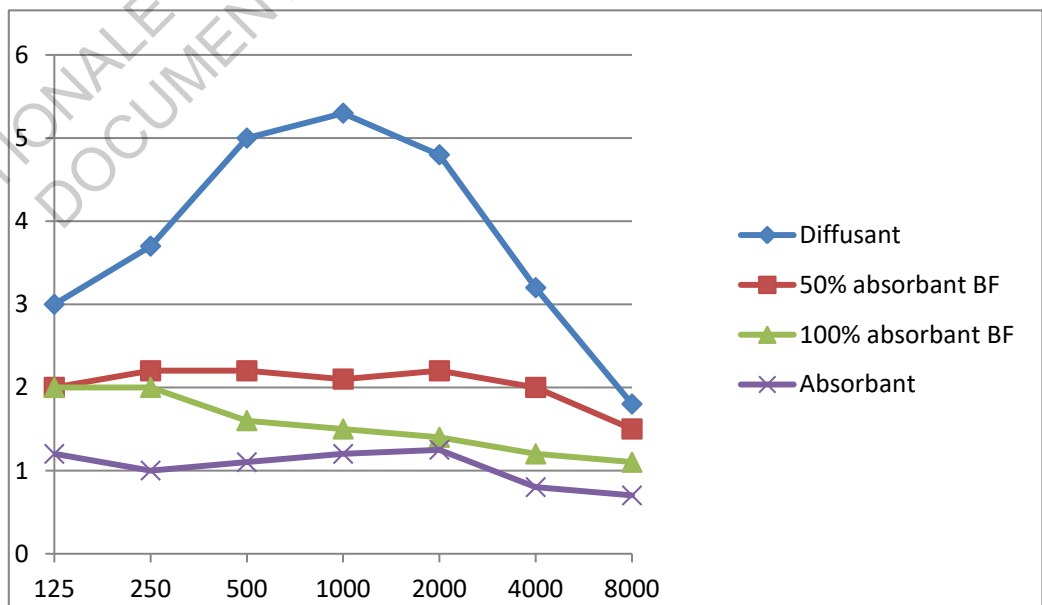
Une étude a été réalisée pour évaluer l'efficacité des panneaux absorbants, et notamment comparer l'efficacité des périactes absorbants hautes fréquences aux périactes absorbants basses fréquences. Deux courbes ont été obtenues en relevant le temps de réflexion en fonction de la fréquence avec un plafond à 11 m. Dans les deux cas, on a comparé les situations diffusante, avec tous les panneaux absorbants, avec 50 % des panneaux absorbants basses fréquences (resp. hautes fréquences) et 100 % basses fréquences (resp. hautes fréquences).

Dans le cas de basses fréquences, on a une absorption relativement homogène sur toutes les fréquences, le temps de réverbération diminue également de 125 Hz à 1000 Hz avant de ne plus rien absorber progressivement jusqu'à 8000 Hz. Pour le cas des périactes absorbants hautes fréquences, on observe une absorption sur toutes les fréquences sauf les très élevées (8000 Hz), avec un pic entre 250 et 2000 Hz, on observe une égalisation du temps de réverbération. Son efficacité en basse fréquence est quasiment la même que pour les périactes absorbants basses fréquences. Les deux types de périactes n'ont pas du tout le même effet. Ce qui est intéressant de noter ici, c'est qu'en réalité, c'est bien la combinaison des deux types qui est source de possibilités multiples.





25 Temps de réverbération (s) en fonction de la fréquence (Hz).
Cas Basses Fréquences.



26 Temps de réverbération (s) en fonction de la fréquence (Hz).
Cas Hautes Fréquences.

4. Le plafond et rideaux

a. Descriptif

Le plafond **Fig.27** est divisé en trois parties, recouvertes elles aussi de périactes, et chaque partie peut monter ou descendre d'une hauteur allant de 1,5 m à 10,5 m. Le plafond permet un jeu acoustique certes, mais aussi psycho-acoustique. Ils sont contrôlés par des moteurs et nécessitent un entretien régulier.

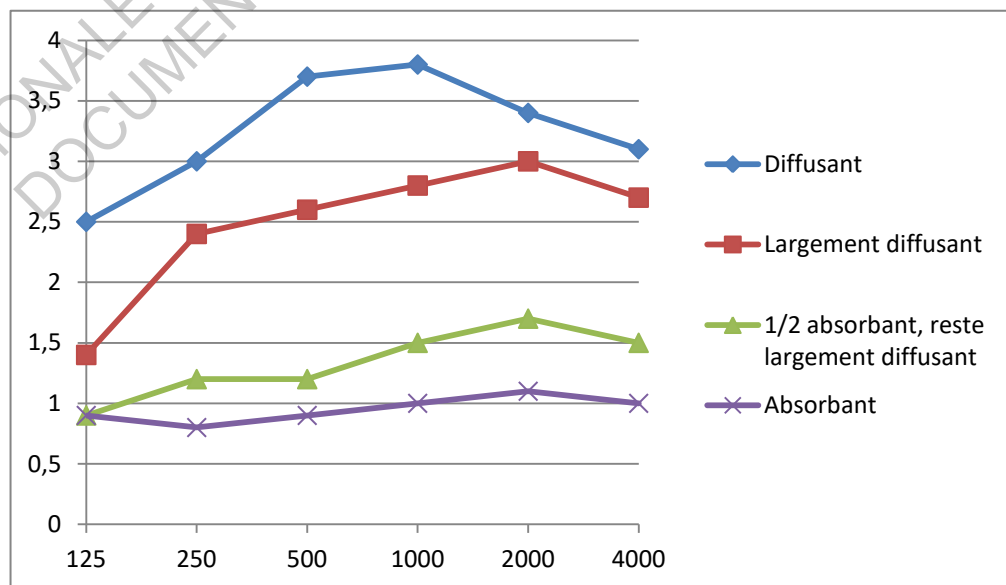
Les volets de l'*Espace de projection* sont au nombre de 3 et passent entre les différentes parties du plafond sur toute la largeur de la salle. Ceux-ci permettent une fragmentation de l'espace et influent sur les dimensions psycho-acoustique et acoustique.

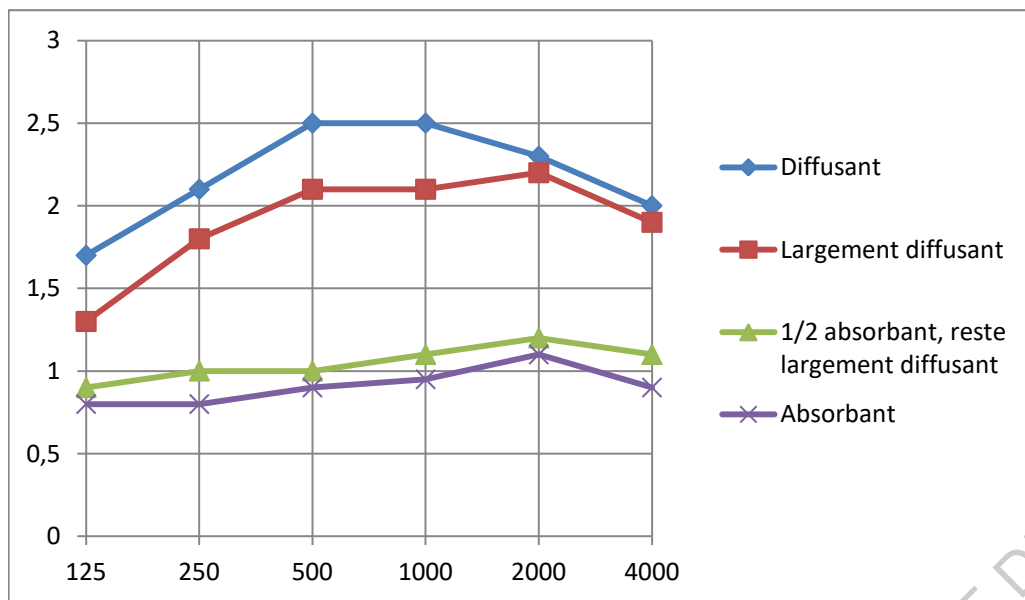


b. Influence de la hauteur du plafond

Des expériences ont été menées afin d'évaluer l'influence de la hauteur du plafond sur le temps de réverbération. La hauteur du plafond a été changée trois fois pour valoir 10 m, 5 m puis 3,2 m. Cette opération a été réalisée sur une plage de fréquence allant de 125 Hz à 4000 Hz, et pour quatre dispositions des périclives: diffusante, largement diffusante, absorbante, la moitié des périclives en position absorbante et le reste en position largement diffusante.

On remarque que plus le plafond est bas, plus le temps de réverbération diminue, et ce dans toute les situations, en accord avec la formule de Sabine. Il est aussi intéressant de noter que plus le plafond est bas, plus les situations diffusantes et largement diffusante ont tendance à se confondre, idem entre les situations absorbante et semi-absorbante. On a globalement un effet d'aplatissement avec peu de différence du temps de réverbération selon les fréquences.





29

Évolution du temps de réverbération (en secondes)
en fonction de la fréquence (Hz).
Hauteur du plafond = 5m.

Absorbant

0,6

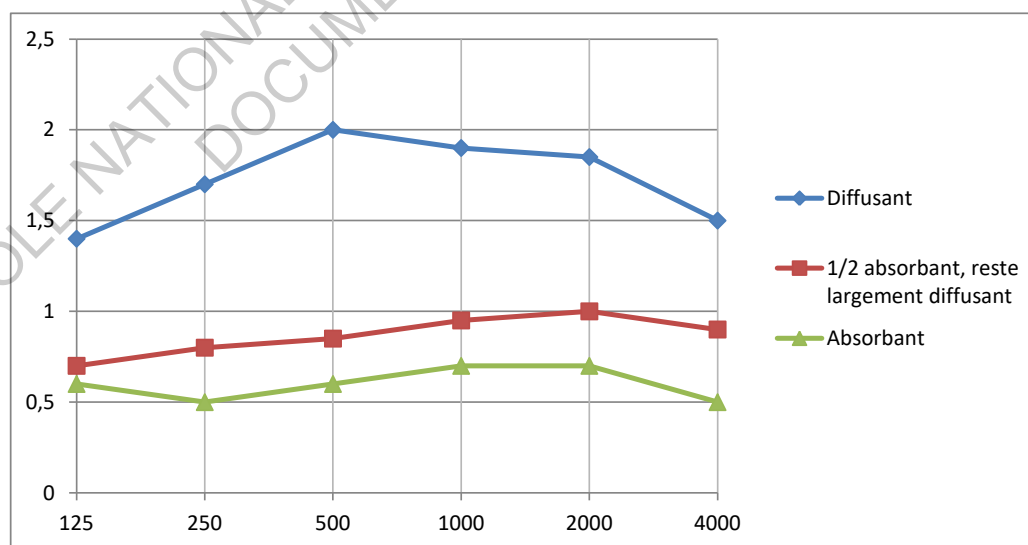
0,5

0,6

0,7

0,7

0,5

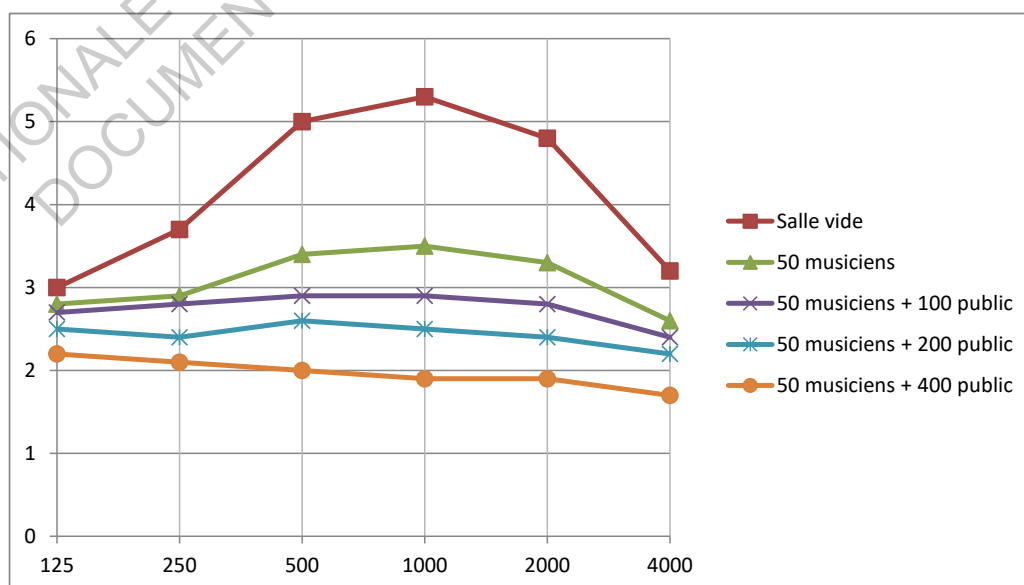


30

Évolution du temps de réverbération (en secondes)
en fonction de la fréquence (Hz).
Hauteur du plafond = 3,2m.

c. Influence du public

Les périactes jouent un rôle prédominant dans le timbre que va avoir la salle, car ils décident du temps de réverbération de la salle, au moins quand elle est vide. En effet, la quantité de spectateurs et musiciens a un effet non négligeable sur le temps de réverbération car le corps humain est un matériau absorbant assez efficace. Une étude a été menée pour en évaluer l'impact. La salle vide laisse les fréquences entre 250 et 4000 résonner très largement en situation diffusante. On peut observer que plus il y a de public, plus le temps de réverbération est court, il a aussi tendance à s'égaliser sur les fréquences. Dans la situation diffusante, le temps de réverbération reste tout de même sensiblement long (entre 2,7 et 3 secondes pour un public de 100 personnes). On arrive à un temps beaucoup plus classique (aux alentours de 2 secondes) avec 400 personnes.



5. Eyring ou Sabine?

Les formules de Sabine et Eyring sont plus ou moins adaptées selon la situation, mais celle de Sabine est plus simple à utiliser. Dans les deux cas, on néglige les effets de bords puisqu'on se place en champs diffus et parois possédant le même coefficient d'absorption. On admet que leur emploi présuppose que les longueurs caractéristiques sont du même ordre et que leur rapport ne dépasse pas le facteur 5 et que les différences d'absorption entre parois qui se font face ne sont pas trop grandes (facteur 3 maximum).

Une étude a été menée pour voir si la formule Eyring était justifiée, mais d'après les résultats obtenus, on obtient les mêmes résultats à 1 ou 2 % près, son emploi ne se justifie pas.

Dans son *Guide méthodologique pour l'étude d'une salle acoustique*, Jacques Jouhaneau précise que la formule de Sabine donne un résultat valide à 0,1s près pour les configurations de l'*Espace de projection* dont le temps de réverbérations est compris entre 0,8s et 3,5s.

Tableau I Influence de l'effet Eyring

	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Valeur mesurée en C	0,997	1,026	1,009	1,002
Valeur calculée de C d'après Eyring	1,028	1,039	1,032	1,027
Précision (écart type)	2%	2%	1,5%	1,5%

6. Hypothèse des champs diffus

L'étude de la salle de l'*Espace de projection* s'est déroulée dans l'hypothèse où nous aurions affaire à des champs diffus. On a ignoré jusqu'à maintenant l'emplacement des périactes absorbants dans la salle. une étude a donc été menée, lors de laquelle, une même quantité de périactes absorbants ont été localisés à divers endroits: angles, plafond, de façon uniforme, au centre des parois. On a obtenu 3 temps de réverbération T_{ISO} , T_{regr} et $T_{1stcomp}$:

- T_{ISO} est le temps de réverbération d'après ISO, entre -5 dB et -35 dB;
- T_{regr} est le temps obtenu à partir d'une méthode de régression;
- $T_{1stcomp}$ est la première composante des deux temps précédents.

Les deux premiers temps ont été reconstitués à partir de nombreuses mesures pour obtenir une meilleure précision.

Les résultats obtenus montrent bien que la localisation des périactes absorbants a un impact non négligeable sur le temps de réverbération, le seul calcul du temps de réverbération ne permet pas de rendre compte des qualités d'une salle.

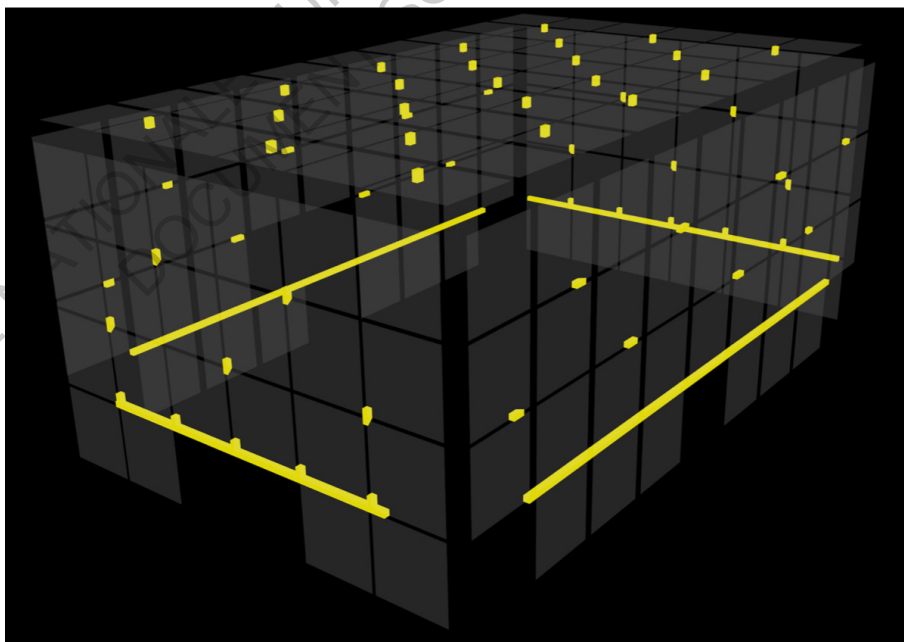
Tableau II Influence de la distribution de l'absorption sur T

Localisation de l'absorbant	T ISO		T regr		T 1st comp.	
		2 Sm		2 Sm		2 Sm
1. Plafond	1,883	0,02	1,858	0,01	1,866	0,04
2. Angles	1,913	0,02	1,885	0,01	1,981	0,02
3. Centre des murs et du plafond	1,828	0,02	1,875	0,02	1,786	0,06
4. également réparti	1,912	0,02	1,922	0,02	1,977	0,07

7. Implémentation d'un système wfs et ambisonique

L'IRCAM a fait l'acquisition entre 2008 et 2011 d'un système de Wave Field Synthesis (WFS) et d'un système ambisonique. Le WFS est composé de 264 haut-parleurs répartis sur un plan horizontal tout autour de la salle. Le système ambisonique sphérique est lui composé de 75 haut-parleurs qui forment un dôme pour une diffusion tridimensionnelle. **Fig. 34+35**

La mise en place de ces systèmes offrent aux compositeurs de nouveaux outils de composition, dont un des premiers exemples serait *Operspective* de P. Schoeller, mais on pourrait aussi citer des travaux d'Emmanuel Nunes, Xenakis ou Stockhausen, qui sont arrivés plus tard.



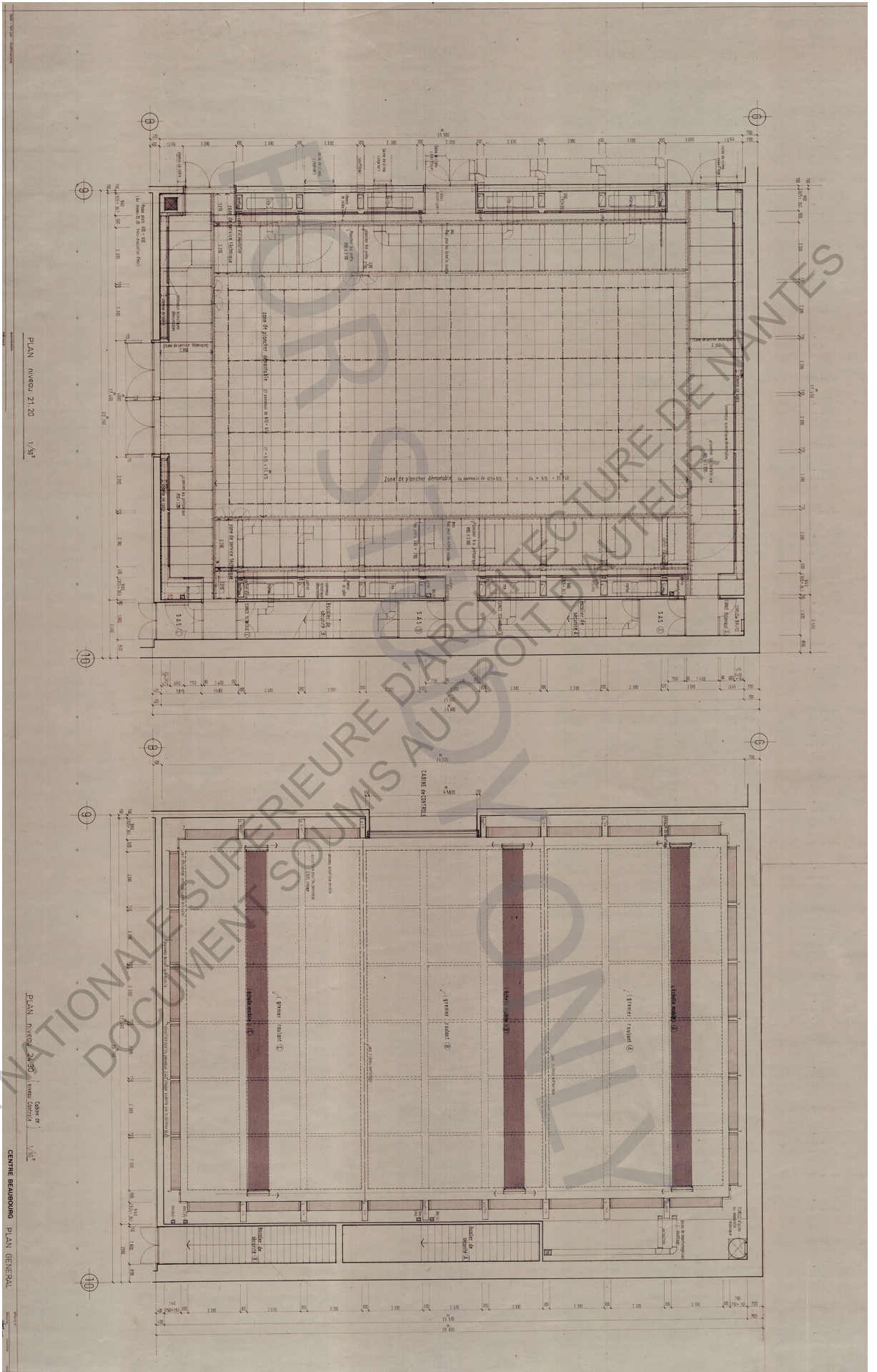


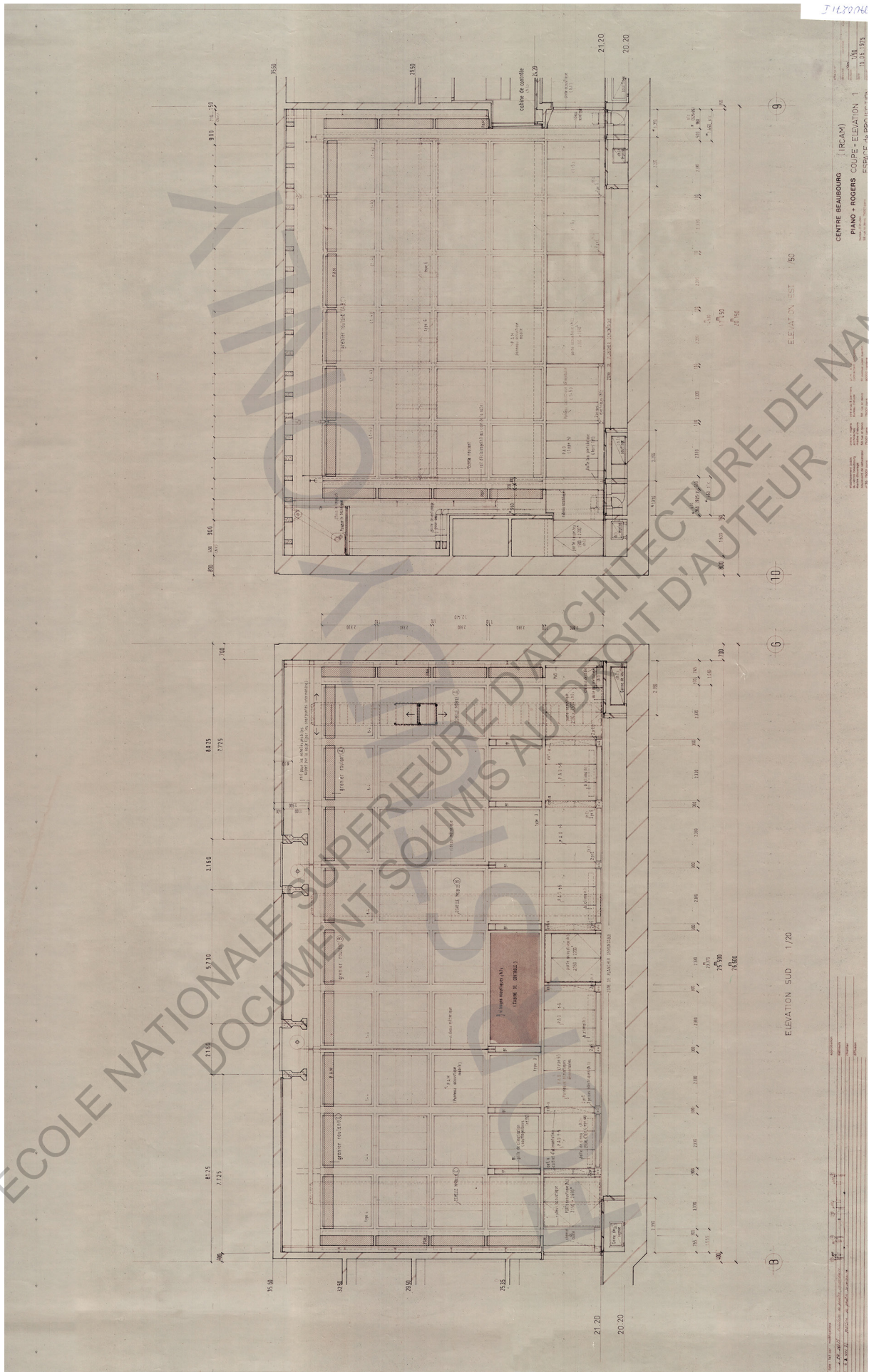
8. En résumé

L'*Espace de projection* possède les caractéristiques suivantes:

- longueur: 24,5 m
- largeur: 15,5 m
- hauteur: 1,5 m à 10,5 m
- volume max: 6800 m³
- accueil: jusqu'à 350 personnes
- temps de réverbération: 0,4s (studio) à 4s (cathédrale)

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR





D. Quelles attentes pour l'Espace de projection?

1. Après son ouverture

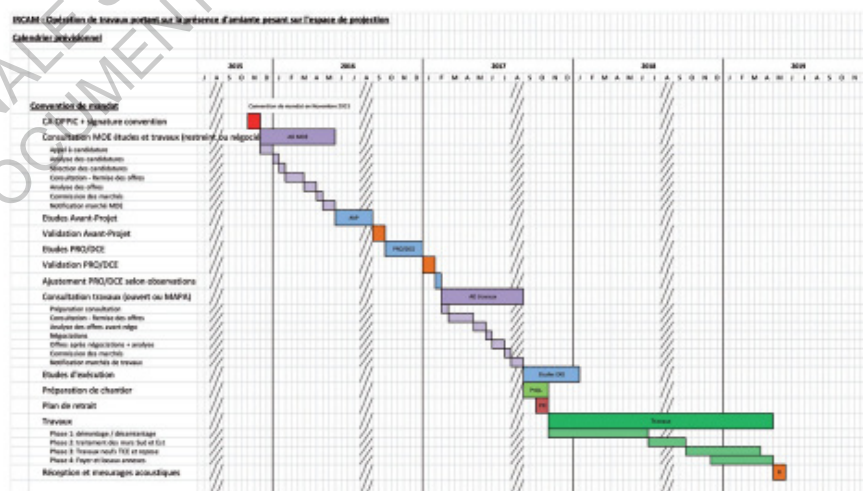
L'*Espace de projection* a ouvert officiellement en 1978, une année après l'ouverture de l'IRCAM. Cette salle a été conçue comme un prototype acoustique qui devait permettre concerts et expériences dans une visée de promotion et développement de la musique contemporaine. En 1977, on peut lire dans le rapport de Gerald Bennett que l'*Espace de projection* est perçue comme ce qui sera un outil d'étude pour la recherche en acoustique de salle, ce qu'il justifie par le développement de l'agence Peutz d'un algorithme anticipant le temps de réverbération à partir de trois composantes. En 1978, l'*Espace de projection* est donc ouvert, dont la réalisation relève de la «performance» toujours selon Bennett dans le rapport de 1978 cette fois-ci. On parle toujours d'acoustique de salle et de la recherche d'un algorithme plus adapté à la recherche du temps de réverbération. Ce travail a été mené par James A. Moorer. L'année suivante a été marquée par la nécessité de devoir mener des travaux pour mettre la salle aux normes sécuritaires en vigueur notamment concernant le plafond mobile. Peu d'expériences ont été menées, mais celles qui l'ont été ont plus cherché à résoudre le problème de la faible réverbération des fréquences basses, sans succès alors. Les moments d'ouverture de la salle ont cette année été plus dédiés aux concerts qu'à la recherche. La recherche sur le temps de réverbération et surtout sa modélisation informatique semblait générer un fort intérêt des musiciens ou compositeurs s'intéressant notamment aux diverses formes de synthèse des sons. Les rapports d'activité suivants que j'ai trouvés ne datent que de 1997 et restent incomplets jusqu'à celui de 2010. On trouve alors la trace de quelques projets, comme le projet ORGUE mené à partir de 2001 et les effets acoustiques de la pédagogie *Bel Canto*, (un style de vocalité). Dans les deux cas, il s'agit de deux expériences qui nécessitent en effet un environnement qui permet une multitude de tests, comme peut le faire l'*Espace de projection*. Il fait peu de doutes que d'autres expériences du même type aient eu lieu dans cet espace, cependant, on ne trouve pas de trace de pièces musicales incorporant l'*Espace de projection* en tant qu'élément d'acoustique variable passif.

2. Usage actuel

Les premiers rapports complets à disposition datent de 2010, date à laquelle l'évènement majeur est l'installation d'un système ambisonique aux ordres supérieurs, puis celui du système mixte de WFS et ambisonie. La mise en place du dit système s'est cependant heurté à un problème architectural dû à la rotation des périactes dans les angles. Le système est opérationnel en 2012. Elle participe aussi depuis 2007 au programme CO-ME-DI-A qui consiste à relier deux espaces géographiquement éloignés afin d'y produire une performance (*ex: Lux Lucis* de Valerio Sannicandro), c'est une forme d'incorporation des réseaux à la composition musicale. L'*Espace de projection* accueille sur cette période des colloques, des ateliers musicaux, des expériences et évidemment des concerts. Cette programmation est somme toute assez logique et rentre dans les objectifs initiaux de l'IRCAM qui voulaient une ouverture de la musique contemporaine au public, ainsi qu'une collaboration entre musiciens et scientifiques. Il est assez intéressant de noter que dans les rapports de l'IRCAM, la face de l'*Espace de projection* la plus mise en valeur n'est plus sa grande malléabilité mais le système d'immersion en 3D, les périactes qui rendaient la salle révolutionnaire à son ouverture sont passés sous silence. C'est bien ce système WFS-Ambisonie très avancé qui est vendu aujourd'hui et exploité par scientifiques et musiciens, pour développer des logiciels, procédés à un public plus large, pas seulement restreint à la musique contemporaine comme l'explique Natasha Barrett dans son article *La perception, évaluation et application créative d'Ambisonics d'ordre élevé dans la pratique de la musique contemporaine*. L'emploi d'un tel système a nécessité le développement d'une suite de logiciels IRCAM Tools, dont Spat aujourd'hui un plug-in compatible avec des logiciels de traitement de son comme Pro Tools ou Ableton live. L'*Espace de projection* est aujourd'hui un outil de développement de logiciels en partenariat avec des acteurs de l'industrie du son comme Apple ou Flux entre autres, ce qui peut poser des questions quant à la gestion de l'argent public, malgré les bénéfices réalisés, ces travaux d'état sont exploités par des industries privées et la liberté de l'IRCAM est diminuée, un mal nécessaire?

3. Un coup d'arrêt en 2011

En 2011, on a remarqué une pollution à l'amiante dans le sous-sol de l'IRCAM, des mesures ont été prises afin de limiter son impact, et depuis 2014, la salle est fermée pour études et travaux de réhabilitation. En plus des travaux de désamiantage, l'*Espace de projection* devrait aussi subir un rajeunissement de ses systèmes, et remise à niveau numérique, notamment pour les périactes, une première en plus de 40 ans d'existence. Après une première permettant d'évaluer l'importance des travaux nécessaires, ces derniers devaient commencer en juin 2016. Le rapport 2015 a cependant remis à jour ces attentes, les travaux devraient se terminer au mieux, courant 2019 et plus en 2017.



E. Premières impressions

Les espaces possédant une acoustique variable sont fréquents, et régulièrement créés car ils proposent un moyen simple au premier abord d'obtenir une multitude de géométries et donc d'usages pour une même salle. On peut donc en théorie, avoir une salle qui peut accueillir des concerts de rock, électro ou classique. C'est donc aussi une solution pour amortir les coûts sur le long terme et d'avoir une programmation variée. On ne compte donc plus les salles de spectacle possédant un plafond amovible, ou des gradins modifiables.

L'*Espace de projection* rentre dans ce mode de penser, mais le modèle est poussé à l'extrême, offrant ainsi, en apparence tout du moins, une flexibilité inégalée, qui multiplie les possibilités acoustiques et psycho-acoustiques.

Le rapport Peutz sur l'*Espace de projection* ainsi que *Lire l'IRCAM* proposent un visage de l'*Espace de projection* séduisant. Ainsi, le rapport Peutz explique que les premiers retours concernant la salle ont été très positifs.

«L'Espace de projection est utilisé depuis plus d'une année. Bien qu'il ne soit pas encore possible d'explorer toutes les possibilités, l'impression générale est très favorable. Il n'est pas difficile d'ajuster l'acoustique de la salle à une valeur optimale, la salle est ainsi considérée comme une salle de concert. Varier l'acoustique est en fait un moyen d'expression musicale. La salle répond très favorablement pour les enregistrements. Récemment, l'opéra *Lulu* d'Alan Berg, dirigé par Pierre Boulez a été enregistré dans cette salle. Il est remarquable de noter que le nombre de microphones nécessaires était extrêmement limité.»

La grande malléabilité du lieu est constamment mise en avant, et par là, c'est bien l'aspect mécanique, futuriste de cette salle qui est valorisé et vendu pour un certain nombre d'événements. Toutefois, nous pouvons noter que ce rapport a été rédigé en 1977 par l'entreprise en charge de l'aspect acoustique de la salle, tandis que *Lire l'IRCAM* est un ouvrage commandé par l'IRCAM. Ces deux ouvrages n'offrent pas un point de vue très objectif concernant la salle. Le plus grand

atout de l'*Espace de projection* se trouve dans le fait qu'il est censé pouvoir accueillir tout type d'événement, mais pas particulièrement comme salle de concert. D'ailleurs, en discutant avec un compositeur de l'IRCAM, Yann Robin, il est ressorti que cette salle possède bien un son qui lui est propre, pas forcément adapté à toutes les œuvres. Certaines pièces ont aussi été écrites spécifiquement pour cette salle. On observe une situation paradoxale pour une salle telle que l'*Espace de projection* qui doit pouvoir tout accueillir, mais fait preuve d'une acoustique assez particulière pour ne pas être satisfaisante pour toutes les pièces.

Enfin, aujourd'hui, au sein même de l'IRCAM, l'usage de l'Espace de projection a considérablement changé, alors qu'on le présentait comme un moyen de faire des avancées considérables en terme d'acoustique des salles, il semble qu'il ait subi une réorientation avec le développement de nouvelles technologies électro-acoustiques. Sa variabilité est surtout mise à contribution lorsqu'il s'agit d'effectuer des expériences qui n'ont pas de visée spatiale. Cette salle reste néanmoins à la pointe de la recherche acoustique spatiale, plus à cause du système de périactes, mais par le dispositif de WFS-Ambisonics de 2012.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

III. Comment la production contemporaine et l'Espace de projection se sont-ils influencés?

A. Et si on était un peu plus critiques?

1. Renouveler la musique contemporaine au début du XX^e siècle

Considérant le peu d'objectivité proposé par les divers ouvrages offrant un regard objectif, extérieur sur cette salle, il me semble important de tenter d'être un peu plus critique vis-à-vis de cette salle. Aussi une recontextualisation de la salle dans l'histoire de la musique contemporaine a pu me permettre d'adopter un autre point de vue. Je me suis plus particulièrement intéressé à l'intégration de la dimension spatiale dans la musique, fut-elle par le biais d'une nouvelle organisation scénique d'un orchestre ou de l'intégration de nouveaux procédés musicaux, comme l'électro-acoustique. Varese fait état en 1917 de nouveaux besoins pour la musique :

«La musique qui doit vivre et vibrer a besoin de nouveaux moyens d'expression, et la science seule peut lui infuser une sève adolescente. Je rêve les instruments obéissant à la pensée et qui, avec l'apport d'une floraison de timbres insoupçonnés, se prêtent aux combinaisons qu'il me plaira de leur imposer et se plient à l'exigence de mon rythme intérieur».

Cette citation va dans le même sens que la citation de Pierre Boulez lorsque celui-ci définissait le rôle de l'IRCAM. C'est surtout au XX^e siècle que l'on a vu se développer en musique, une véritable considération spatiale, notamment par des compositeurs comme Varese, Stockhausen ou Xenakis. Ainsi, Varese a déjà, dans *Intégrales*, tenté d'incorporer une dimension spatiale dans la musique, toutefois, celle-ci ne se voit pas, elle a été écrite en pensant aux effets d'interpolation du son, des timbres des différents instruments dans l'espace. En conséquence de quoi, cette œuvre n'a finalement un intérêt que si elle est vécue dans l'espace où elle est produite, et cet espace impact nécessairement l'œuvre. La dimension psycho-acoustique de l'œuvre fait que cette dernière s'inscrit particulièrement bien dans la logique de conception de l'*Espace de projection*.

2. Spatialisation: quelques exemples pré-Espro

a. Qu'est-ce-que la spatialisation?

En musique, la spatialisation correspond à la prise en charge de l'espace dans la composition. La spatialisation peut prendre diverses formes, et a pris diverses formes aux cours des années. Dans une composition, on peut grosso modo définir:

- une ou des sources sonores (ponctuelles ou non, fixes ou en mouvement);
- une ou des zones d'écoute;
- la limite entre source et auditeur.

Tout le jeu de la spatialisation consiste à jouer sur ces paramètres pour proposer des expériences nouvelles. Le but de cette partie est de proposer une liste non-exhaustive de situations qui proposent une spatialisation différentes à chaque fois. Ces situations seront présentées dans un ordre à peu près chronologique de 1950 à nos jours. Leurs principes seront ensuite comparés aux potentialités de l'*Espace de projection*.

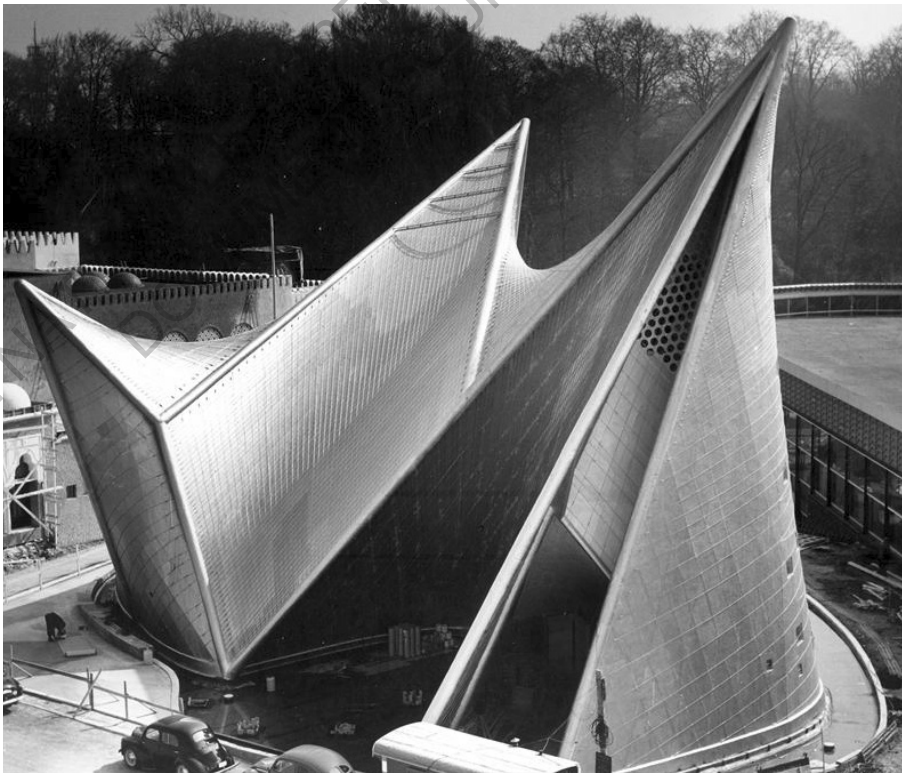
b. Pierre Schaeffer et musique concrète

Pierre Schaeffer (1910-1995) **Fig.39** est un scientifique polytechnicien qui s'est particulièrement intéressé au son dans son état le plus brut. Il ne fait pas de distinction entre le bruit et le son, et à l'aide de compositeurs et autres scientifiques, il va développer dans les années 1950 un travail des sons sur bandes magnétiques pour les introduire dans des compositions, ce qui a valu à sa musique le nom de musique concrète. Le travail effectué n'est pas à proprement parlé de la spatialisation, mais les résultats obtenus vont inspirer de nombreux compositeurs, tels Stockhausen, Boulez ou Xenakis. C'est aussi un précurseur de la musique électronique.



c. Le Pavillon Philips

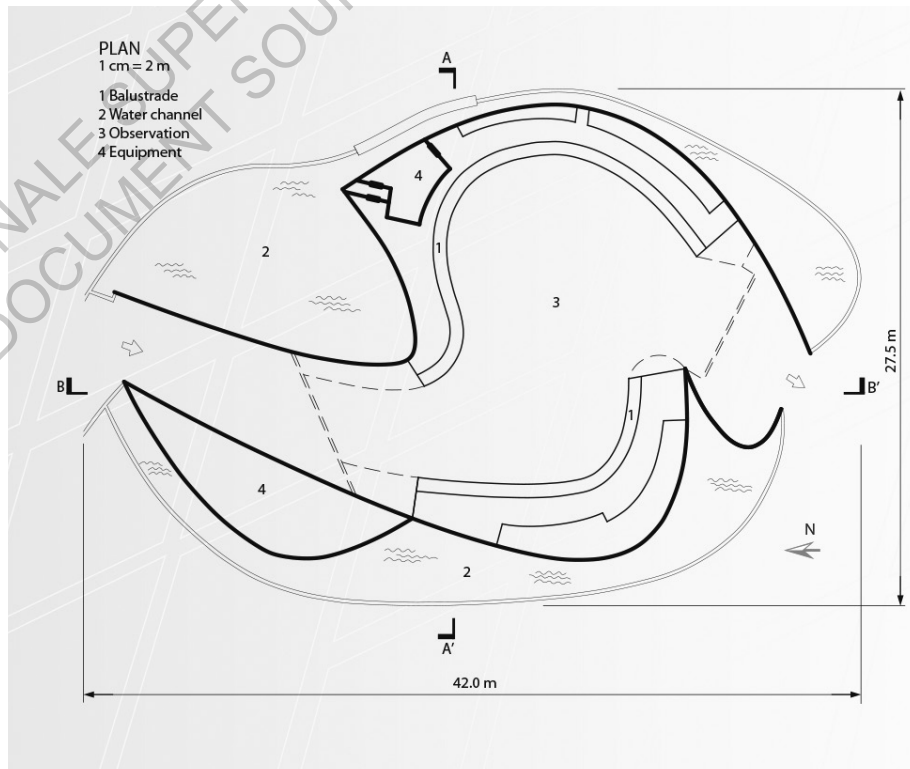
Lors de l'Exposition universelle de Bruxelles en 1958, l'entreprise Philips commande au Corbusier un pavillon. **Fig.40, 41** Ce dernier est laissé à la charge de Xenakis, qui semble être le plus à même de réaliser ce projet, en tant qu'architecte et compositeur. Ce pavillon est assimilable à un estomac que traversent les spectateurs. Le pavillon est constitué de 9 hyperboloïdes, qui permettent un espace libre à l'intérieur. À ce projet est associé Edgard Varese à qui l'on commande une œuvre adaptée au lieu: le *Poème électronique*. Le Poème doit accompagner une projection d'images décidées par Le Corbusier, toutefois, comme l'avouera Varese, ces deux productions gardèrent leur indépendance. Ce Poème est spatialisé à l'aide de plus de 400 haut-parleurs (c'est colossal) sur les murs qui suivent une route de sons qui entrent en interpolation en vue de créer des sonorités nouvelles. Ces prouesses techniques permettent une immersion du public, et une expérience psycho-acoustique jamais vue à cette époque. C'est bien cet aspect nouveau qui est la clé de voûte de l'œuvre.



40

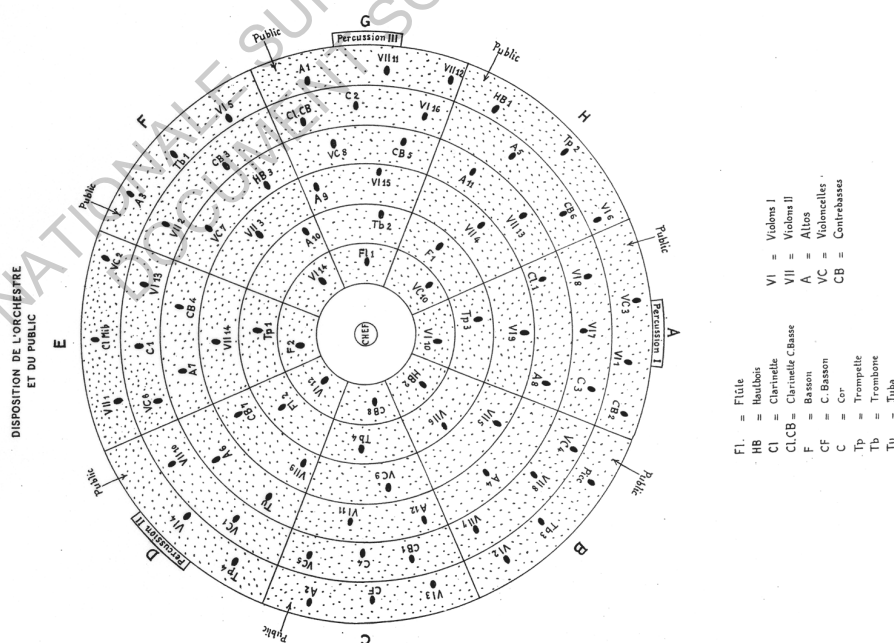
Pavillon Philips.

En terme de spatialisation, l'auditeur est entouré par une multitude de sources ponctuelles qui crée un champ sonore. Il ne s'agit pas encore de Wave Field Synthesis, mais on peut la deviner, et c'est révolutionnaire. Le rapport source auditeur n'est pas frontal, l'auditeur est ici englobé par le son.



d. Terretektorh

Cette œuvre de Xenakis, réalisée entre 1965 et 1966, est également une expérience spatiale. Toutefois, à la différence des Polytopes, cette œuvre fait la part belle aux instruments acoustiques, et n'est pas destinée à un lieu en particulier, encore que, toutes les salles ne peuvent accueillir cette pièce. Celle-ci est composée pour un orchestre de 88 instrumentistes, répartis en huit groupes (de A à H) dans un espace circulaire. **Fig.42** Le public est également intégré à cet espace afin de briser la limite classique entre musiciens et spectateurs et d'offrir une expérience de proximité nouvelle. Cette disposition offre également la possibilité d'essayer de créer un mouvement au sein de la musique. Ce type de dispositif orchestral n'est cependant pas à approprier à Xenakis, puisqu'un certain nombre de compositeurs ont eu recours à ces expérimentations, comme Stockhausen au Pavillon allemand d'Osaka. Quoi qu'il en soit, cette volonté de briser les barrières spatiales de l'œuvre musicale prend ici la forme d'une déformation des codes orchestraux, et modifie sensiblement le ressenti de l'œuvre.



e. Carré

Carré a été écrit en entre 1960 et 1961 par Karlheinz Stockhausen. C'est une œuvre pour quatre orchestres qui jouent chacun une partition à des tempi différents. Il y a donc un jeu sur la superposition des champs. L'autre particularité de cette pièce est que les musiciens peuvent être en mouvement comme cela a été le cas à Saint-Paul de Vence, un peu en échos à *Musik für ein Haus*. On a en tout 77 musiciens, 32 ou 48 chanteurs et 4 chefs d'orchestre. **Fig.43**



f. Polytopes

Les Polytopes constituent un ensemble d'œuvres réalisées par Iannis Xenakis, qui s'inscrit en continuité du Pavillon Philips. Au nombre de quatre (dans l'ordre: Montréal, Persépolis, Cluny et Mycènes) plus le diatope du Centre Pompidou, le premier polytope fut réalisé en 1967 à Montréal dans le pavillon de la France lors de l'Exposition universelle. Les Polytopes sont des spectacles de «son et lumière» qui ont été réalisés pour un lieu spécifique. Les Polytopes sont aussi le fruit d'une réflexion mathématique de la part de Xenakis qui consiste à représenter des concepts. Alors que l'on aurait pu s'attendre à une corrélation entre jeux de lumière et acoustique, les deux compositions restent à chaque fois indépendantes l'une de l'autre, à l'image du Pavillon Philips. L'œuvre totale des Polytopes est une œuvre s'inscrivant dans une multitude de lieux, les exploitant, s'en inspirant pour développer un espace de la musique contemporaine. Un autre aspect non-négligeable des Polytopes et du Diatope est la volonté constante de surprendre le public par une utilisation technologies nouvelles. Ainsi, comme le fait remarquer Makis Solomos, les Polytopes peuvent être considérés comme «une prophétie dans le domaine du multimédia».

3. L'Espace de projection, un espace déjà en retard?

En étudiant ces quelques œuvres, qui représente un échantillon non-exhaustif de ce qui a été réalisé en musique contemporaine avant la création de l'IRCAM, l'*Espace de projection* tel qu'il a été réalisé pose question. En effet, malgré ses fortes capacités d'adaptation à un programme, pouvant finalement servir autant à un ensemble de musique de chambre qu'à un orchestre symphonique, on a cette désagréable impression que cet espace est en décalage avec son temps et l'usage qui aurait pu, dû être le sien. Deux points posent particulièrement problème. Alors que des pièces comme le *Poème électronique*, les *Polytopes* ont été réalisées près de 20 ans avant sa mise en fonctionnement, et que la fin du XX^e siècle a assisté à une explosion des technologies électroniques, comment se fait-il que l'*Espace de projection* se soit si peu concentré sur cet aspect finalement très porteur pour la musique contemporaine? Ensuite, malgré les possibilités psycho-acoustiques du lieu (plafond, volets, périactes) on a tout de même l'impression que l'aspect visuel, théâtral de la musique a été partiellement laissé de côté. Cette salle est certes modulable, toutefois cette malléabilité est plus de l'ordre acoustique que scénique, alors que le *Terretektorh* et *Carré* jouent autant sur l'acoustique que sur le scénique.

Alors certes, l'*Espace de projection* propose une adaptabilité aux compositeurs qui peut les servir et les stimuler, cependant, alors que l'un des premiers buts de l'IRCAM était de confronter scientifiques et musiciens, on peut s'étonner que les possibilités de cette salle ne s'inscrivent pas dans la continuité du travail de compositeurs établis (Xenakis, Varèse, Stockhausen, Schaeffer), notamment dans les aspects technologiques. On peut s'étonner également à un moindre degré de la pauvre importance donnée à la malléabilité de

l'espace scénique. D'un point de vue architectural, cette salle amène également des interrogations quand à ses qualités spatiales, Iannis Xenakis va même jusqu'à en faire une critique à peine voilée, lorsqu'il décrit les salles polyfonctionnelles, l'architecture mobile.

«L'architecture mobile, c'est de la foutaise, parce que personne n'est capable de remplacer un architecte de valeur. Je préfère, en tant qu'artiste, disposer de quelque chose de figé, d'intéressant, captant, plutôt que de laisser la liberté de structurer l'espace totalement chaque fois qu'il faut s'en servir. La polyvalence prouve l'absence de goût, de volonté, de réflexion de l'architecture»

Xenakis se montre ainsi pour le moins sceptique quant aux qualités intrinsèques de la salle de l'IRCAM. Il prend position plutôt contre l'*Espace de projection*, considérant que cette malléabilité n'est pas nécessairement un atout de composition, au contraire, le manque d'identité d'une telle salle rend difficile son usage, car il enlève des contraintes certes, mais donc aussi un cadre et une singularité.

Finalement, l'adaptabilité de l'espace n'est-elle pas plus destinée à des œuvres plus classiques et ne permet-elle pas ainsi aux instances programmatrices une utilisation, un remplissage optimal? C'est une question légitime, et pas forcément critique, dans le sens où, une utilisation maximale de cette salle est aussi un moyen de financement pour l'IRCAM, bien que cette logique puisse aller à l'encontre de ce que cette salle devait originellement être.

4. Spatialisation post-Espace de projection

a. Un premier constat pas si accablant

Comme vu précédemment, le projet de l'IRCAM naît dans les années 1970, et il est apparu avec les exemples précédents que l'IRCAM aurait pu anticiper l'explosion de l'utilisation des procédés électro-acoustiques par le travail de Pierre Schaeffer, les qualités de visionnaires de Varèse, Stockhausen ou Xenakis. Il faut cependant remettre en perspective cet échec relatif. À cette époque, le prix d'un ordinateur était énorme, en effet, les premiers ordinateurs individuels se sont développés dans les années 1970 et baser toute la production et recherche musical sur un pari sur le futur aurait paru insensé, d'où l'investissement sur des technologies plus accessibles: des panneaux rotatifs mécaniques, malgré leur coûteux entretien. L'IRCAM n'a cependant pas mis longtemps pour réorienter leurs projets vers l'électroacoustique.

Depuis, la majorité des recherches sur l'acoustique de salle de l'IRCAM s'est tournée vers des procédés électroacoustiques que ce soit pour le traitement du son, sa projection, spatialisation, immersion. Ces recherches n'ont pas non plus vocation à n'être destinées qu'à l'*Espace de projection* ou à la musique contemporaine. Il y a une volonté d'ouverture et de partage aux champs extérieurs (industrie, musique actuelle, art...). Si cette réorientation profite à des entités extérieures, elle profite aussi aux éléments internes à l'IRCAM: les compositeurs. On peut trouver de nombreuses pièces qui se sont servies de ces nouvelles technologies pour apporter une nouvelle dimension à la musique contemporaine.

On s'intéressera ici à quelques œuvres manifestes de cette nouvelle vague de composition, qui redonne du sens à l'*Espace de projection*.

b. Répons

Répons est une œuvre de Pierre Boulez qui a été composée en 1981 puis modifiée en 1982 et 1984. Un orchestre de 24 musiciens est sur une scène entouré par le public et 6 solistes entourent ce public.

Fig.44 Entre ces solistes, des haut-parleurs reliés entre eux et gérés par un ingénieur du son retransmettent les passages des solistes tout en les transformant et les faisant circuler entre eux. Cette pièce a été développée dans l'*Espace de projection* car elle a pu bénéficier de tout le système électroacoustique de la salle. Elle a néanmoins été produite pour la première fois à la Cité de la Musique, à Paris. Le système électrique et la disposition de la salle est suffisamment particulière pour que l'on puisse considérer cette œuvre comme un manifeste de spatialisation dédié à l'IRCAM, bien qu'elle ait été jouée dans d'autres salles, dont le Carnegie Hall à New York.



c. Quodlibet

Ce morceau a été écrit en 1991 par Emmanuel Nunes, compositeur portugais, pour le Coliseu dos Recreios à Lisbonne. **Fig.45** L'ensemble est constitué de 79 musiciens dirigés par deux chefs, le tout divisé en 4 groupes: 1 orchestre fixe de 45 musiciens, 7 solistes immobiles, 6 percussionnistes et un ensemble mobile de 21 musiciens. Le public est dans ce système tout comme le lieu qui fait partie de la pièce. Il n'y a pas utilisation de système de spatialisation électrique, mais contrairement au rapport scénique classique, le lieu scénique n'est pas un contenant, mais est contenu dans la pièce, il y a immersion du public dans la musique à l'image d'*Expo* de Stockhausen à Osaka.



d. Autres pièces

Ces autres pièces sont plus récentes et n'ont pas eu le rayonnement qu'on pu avoir les pièces précédentes. Elles n'en ont d'ailleurs pas nécessairement la vocation. Elles se placent dans le cadre de l'IRCAM qui commande tous les ans des compositions qui doivent mettre en valeur les découvertes, avancées de l'année réalisées à l'IRCAM.

Dans leur cas, en lien avec l'installation du système mixte WFS-Ambisonics, Natasha Barrett a composé *Hidden values* et *Fluoresce* de Rama Gottfried, ces deux morceaux sont accessibles en binaural, et le rendu est très intéressant, en plus de ne pas être trop difficile d'accès comme peut souvent l'être la musique contemporaine. Le dynamisme apporté par la spatialisation ouvre la voie à un nouveau type de performance. Les deux morceaux avaient pour ambition d'explorer les potentialités d'intégration d'un système tel qu'il y a à l'IRCAM dans un morceau de musique, voir dans une performance. Le premier s'est particulièrement intéressé au système ambisonique aux ordres hauts, et à la recréation de l'ambiance d'une salle dans une autre par le système ambisonique après traitement. Les deux instrumentistes enregistrés pour la pièce étaient une chanteuse et un percussionniste. La seconde pièce a été écrite pour violoncelle et Espro. Le violoncelle est connecté à un ordinateur, muni d'Ableton et Max, un système permet de détecter les impulsions obtenues avec le violoncelle. Les sons perçus sont ensuite traités et renvoyés pour recréer un espace via le système de WFS.

D'après la lecture des deux rapports produits par Natasha Barrett et Rama Gottfried, ces morceaux ont été créés alors que les connaissances en terme de gestion de ce système mixte restent incomplètes. Ces morceaux sont des expériences vouées à proposer de nouvelles pratiques instrumentales. L'usage des périactes n'est

pas relevé dans ces rapports. La création de telles œuvres a aussi posé quelques contraintes techniques puisque les enregistrements et traitements n'ont pu se faire dans la salle de l'Espro, car son exploitation n'est pas uniquement dédié à ces expériences musicales.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

5. L'Espro un espace créateur

Les exemples précédents font partie d'une liste absolument pas exhaustive, et la quantité de pièces écrites pour l'*Espace de projection* est conséquente tous les ans, et les compositeurs qui ont travaillé sur les systèmes de spatialisation électroacoustiques à l'IRCAM sont nombreux et ont pour certains une reconnaissance internationale en dehors du cercle de la musique contemporaine (Boulez et Nunes entre autres).

Les deux premiers exemples ne sont que le commencement d'une recherche aboutie dans le domaine de l'immersion, mais proposaient déjà une expérience nouvelle par des méthodes de spatialisation à deux niveaux au moins : par brisure des codes classiques de l'orchestre, ce qui n'est pas forcément révolutionnaire puisque cela avait déjà été réalisé chez Xenakis ou Stockhausen, et aussi pour créer cette sensation d'immersion par méthode électroacoustique pour Boulez. *Répons* est extrêmement ancrée dans l'IRCAM et particulièrement l'*Espace de projection*.

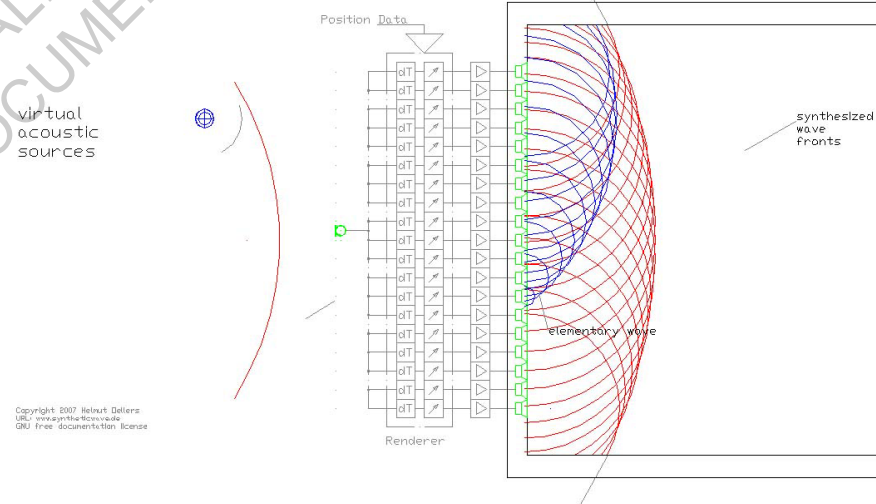
Les deux autres ont été créés pour exploiter les possibilités de ce que Markus Noisternig appelle l'ESPRO 2.0. Dans tous les cas, il semble que l'*Espace de projection* joue un rôle créateur en proposant un cadre unique en son genre, plus par son acoustique variable passive, mais par son dispositif mixte WFS-ambisonics. La variabilité est encore utilisée mais pour des expériences qui n'ont pas de visée créatrice mais plus scientifique ou pour obtenir la bonne acoustique pour une œuvre rejouée. L'*Espace de projection* s'est en quelque sorte renouvelé pour pouvoir à son tour renouveler la musique contemporaine, et bien d'autres champs. En effet, la création d'un pôle à l'IRCAM cherchant à partager et promouvoir les recherches de l'IRCAM avec la danse, l'art et autres a vu le jour en 2006.

B. Retour sur le WFS et l'Ambisonie

1. Wave Field Synthesis

La synthèse de front d'onde ou Wave Field Synthesis **Fig.40** ou encore holophonie est un procédé qui comme son nom l'indique consiste à additionner des ondes sonores issues de sources ponctuelles (haut-parleurs) afin de créer un «front», une enveloppe autour du spectateur. La WFS est un processus qui permet la restitution d'un champ sonore autour des spectateurs. Tout l'intérêt du système holophonique, est qu'il reproduit un champ sonore dans une zone sans qu'il y ait de sweet spot contrairement au binaural et 5.1. En théorie, il s'agit de répartir une infinité de haut-parleurs considérés comme des sources secondaires sur une courbe fermée appartenant à un même plan. Ces sources secondaires permettent de restituer une source primaire virtuelle afin de pouvoir la localiser. En pratique, le nombre de haut-parleurs est toujours fini, et par divers procédés d'approximation, on peut fractionner la courbe et procéder à un lissage pour que les discontinuités ne se sentent plus à l'écoute. Pour une restitution sur un large espace, le nombre de haut-parleurs dépassent la centaine.

wave field synthesis principle



2. Ambisonics

Le procédé Ambisonics cherche lui aussi à recréer un champ sonore dans un espace, mais par une approche différente qui se base sur la décomposition en harmoniques sphériques. Par rapport au WFS, l'approche en sphérique impose l'existence d'un sweet spot, puisqu'on considère la résolution du système au centre de la sphère. Le principe de la méthode consiste aussi à sommer les pressions des différentes harmoniques en ce point central, ce qui correspond à une décomposition en série de Fourier, qui se complexifie en augmentant les ordres (fondamentale puis harmoniques) mais qui élargit aussi le sweet spot. Ce système possède l'avantage de ne pas avoir de contraintes quant à la disposition des sources secondaires. Pour pouvoir reproduire une ambiance sonore, il y a cependant des contraintes techniques sur les microphones qui ne permettent pas encore un enregistrement à un ordre très élevé. Le nombre de haut-parleurs est moindre par rapport au WFS.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'ACCÈS LIBRE

3. Mise en œuvre

La mise en œuvre de système tel que le WFS ou Ambisonics nécessite le développement de logiciels qui sont assez variés. On retrouve évidemment Spat, l'outil développé par l'IRCAM et commercialisé par Flux dans sa gamme IRCAM Tools, mais on trouve aussi DirectSound, SLAB ou EAX.

Nous avons vu plus haut que l'ambisonie se heurtait à des problèmes techniques tels des microphones dont les capacités de captation ne permettent pas le travail en série de Fourier à un ordre suffisant pour que sa restitution ait l'air suffisamment réel. Trinnov ou Soundfield propose des microphones permettant d'accéder à un ordre 5.

La salle où un tel système est mis en place doit être suffisamment absorbante pour éviter que les réflexions ne viennent créer des interférences avec les sources secondaires.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons fait un historique assez rapide de l'acoustique des salles et plusieurs points en sont sortis, dont ce constat qui montre que l'acoustique et l'architecture d'une salle influent largement sur le style de musique produit dans celle-ci. Même si les dernières salles de concert produites ont plus tendance à s'adapter aux œuvres, l'Espace de projection se place comme une salle d'expérimentation d'où doivent émerger les modes de productions musicaux de demain. L'Espace de projection est arrivé à un moment charnière sous de nombreux angles. La science de l'acoustique est encore très récente, elle n'en est qu'à ses balbutiements, l'électronique et les ordinateurs arrivent juste et rien ne laisse prévoir l'essor qu'ils ont eu aujourd'hui.

En parallèle, la musique contemporaine française se trouve un chef de file en la personne de Pierre Boulez. Ce dernier va éliminer ses opposants et profiter de l'érection du Centre Pompidou pour fonder l'IRCAM. Malgré les représentations futuristes qu'ont proposées des compositeurs comme Varèse, Xenakis ou Stockhausen, l'Espro s'est tourné vers un champ mieux maîtrisé de l'acoustique: l'acoustique passive.

La direction de l'IRCAM s'est cependant vite rendu compte du potentiel de la musique électroacoustique, et a fini par se doter progressivement jusqu'à 2012 d'un système avancé de WFS-Ambisonics. Les compositions usant de ce système sont de plus en plus nombreuses et complexes, en fonctionnant en parallèle de la recherche scientifique sur ce sujet. L'*Espace de projection* a évolué considérablement depuis sa création, laissant presque de côté sa variabilité par le biais des périactes.

L'observation de l'organigramme et des partenariats de l'IRCAM a montré une certaine volonté d'ouverture, pour promouvoir son travail dans l'industrie mais aussi dans le monde artistique, et le développer. Il est également assez satisfaisant de voir se dégager un axe de recherche plus clair lors de la dernière décennie, mais à contrario, il est aussi assez déroutant d'observer qu'entre 1980 et 2000, soit une vingtaine d'années, les traces d'activité dans cet espace comme celles qu'on peut trouver aujourd'hui, sont très lacunaires alors qu'il s'agit d'une institution publique. Ce qui revient aussi à questionner le rôle de l'*Espace de projection* en tant que catalyseur de musique contemporaine. L'Espro est-il une salle pour la musique contemporaine? Peut-on même en concevoir une? En effet, celle-ci a vocation à évoluer avec la technique, et si l'Espro est un objet technique, il est voué à devenir obsolète. Son système de WFS lui a donné une seconde vie, mais qu'en sera-t-il de la troisième?

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

A. Bases d'acoustique

1. Caractérisation du fluide et mise en équation du problème tridimensionnel

Le fluide au repos est caractérisé par:

- une pression uniforme P_0
- une masse volumique μ_0
- une vitesse particulaire nulle

L'onde sonore correspond à une variation par rapport à un état d'équilibre, ces variations sont cependant faibles. On définit en un point M à un instant t :

- $p(M, t) = P_0 - P(M, t)$: la surpression
- $\mu_1(M, t) = \mu_0 - \mu(M, t)$: la variation de masse volumique
- $\vec{V}(M, t) = \vec{V}_0 + \vec{u}(M, t)$: la vitesse particulaire

On supposera que $\frac{p}{P_0}$, $\frac{\mu_1}{\mu_0}$, $\frac{u}{V_0}$ sont des infiniment petits d'ordre 1. Les effets de la pesanteur seront négligés, et le fluide sera considéré comme parfait.

On part de trois équations:

- l'équation locale de conservation de la masse:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \operatorname{div}(\mu \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

- l'équation d'Euler:

$$\mu \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \operatorname{grad} \vec{u}) \right) = - \operatorname{grad} P \quad (2)$$

- la relation du comportement du fluide:

$$\mu = \mu(P) \quad (3)$$

On peut simplifier la première équation en ne conservant que les termes du premier ordre:

$$\frac{\partial \mu_1}{\partial t} + \mu_0 \operatorname{div} \vec{u} = 0 \quad (4)$$

La deuxième relation se simplifie en remarquant que l'accélération convective est négligeable devant l'accélération locale. On ne conserve que les ordres 1.

On obtient la simplification suivante:

$$\mu_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = - \operatorname{grad} p \quad (5)$$

Nous obtenons donc deux équations que nous cherchons à découpler pour obtenir une équation régissant la propagation de l'onde. On prend le divergent de l'équation (5):

$$\mu_0 \operatorname{div} \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = - \operatorname{div} (\operatorname{grad} p)$$

On peut faire commuter l'opérateur divergent avec la dérivée par rapport au temps, d'où:

$$\Delta p_1 = - \mu_0 \frac{\partial \operatorname{div} (\vec{u})}{\partial t} = \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial t^2} \quad (6)$$

or l'équation (3) s'écrit au premier ordre sous la forme suivante:

$$\mu_1 = \left(\frac{d\mu}{dP} \right) p_1 = \mu_0 \chi_0 p_1$$

avec $\chi_0 = \mu_0 \left(\frac{d\mu}{dP} \right) p_1=0$ coefficient de compressibilité.

On obtient une équation d'Alembert que vérifie p_1 :

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} = c^2 \Delta p_1$$

où $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \chi_0}}$, la vitesse de propagation de l'onde.

Cette formule est générale, et applicable pour divers type d'ondes, notamment des ondes planes progressives ou des ondes progressives sphériques.

3. Considérations énergétiques

a. Énergie volumique

Le temps de réverbération correspond au temps qu'un son met pour descendre en-dessous d'un certain seuil de décibel qui correspond au millième de la valeur initiale du son. On va tenter donc de rapprocher l'équation précédemment obtenue des considérations énergétiques de Sabine.

On peut diviser l'énergie d'une particule d'un volume $\delta\tau$ en deux, en un point M à un instant t: énergie cinétique et énergie potentielle.

L'énergie cinétique prend la forme suivante: $\delta E_c(M, t) = \frac{1}{2} \mu(M, t) u_1^2(M, t) \delta\tau$. On ne garde que les éléments d'ordre le plus haut qui est non nul, d'où:

$$e_c = \frac{1}{2} \mu_0 u_1^2(M, t) \text{ la densité d'énergie cinétique.}$$

L'énergie potentielle correspond à l'énergie produite par les efforts de pression. On note $p_{1i} = 0$ et $\delta\tau_i = \delta\tau_0$ la surpression et la variation du volume à l'état initial, E. I. et $p_{1f} = p_1$ et $\delta\tau_f = \delta\tau$ à l'état final.

$$\delta W_p = \int_{EI}^{EF} (P_0 + p_1) d\delta\tau'$$

On s'intéresse d'abord au premier terme qui est prédominant δW_{p1} . On remarque que le coefficient de compressibilité vaut: $\chi_0 = -\frac{1}{\delta\tau_0} \frac{d\delta\tau}{dp_1}$ au premier ordre. Donc $d(\delta\tau') = -\chi_0 \delta\tau_0 dp_1$. On peut intégrer entre EI et EF pour obtenir: $\delta W_{p1} = \chi_0 P_0 p_1 \delta\tau_0$ qui est un terme d'ordre 1.

On s'intéresse maintenant au second terme:

$$\delta W_{p2} = \int_{EI}^{EF} -p_1 d\delta\tau' = \int_0^{p_1} \chi_0 \delta\tau_0 p_1 dp_1 = \frac{1}{2} \chi_0 \delta\tau_0 p_1^2, \text{ un terme d'ordre 2.}$$

On définit donc une énergie potentielle volumique:

$$e_p = \chi_0 P_0 p_1 + \frac{1}{2} \chi_0 p_1^2$$

et une énergie volumique totale:

$$e(M, t) = e_p(M, t) + e_c(M, t)$$

b. Puissance et vecteur de Poynting

La puissance qui traverse une surface s'écrit comme suit:

$$P = \iint (p_0 + p_1(M, t)) \vec{S} \cdot \vec{u}_1(M, t)$$

On peut définir un vecteur de Poynting sonore:

$$\vec{H}(M, t) = (p_0 + p_1(M, t)) \vec{u}_1(M, t)$$

On note que ce vecteur correspond à une puissance surfacique (W.m^{-2}).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

c. Intensité sonore

On définit l'intensité d'une onde acoustique comme la puissance moyenne par unité de surface transportée par l'onde. On l'exprime en W.m^{-2} et elle est égale au flux moyen du vecteur de Poynting sonore à travers une surface unitaire perpendiculaire à sa direction de propagation:

$$\bullet \quad I = \langle \vec{\pi} \rangle \text{ ou } \langle \vec{\pi} \cdot \vec{n} \rangle$$

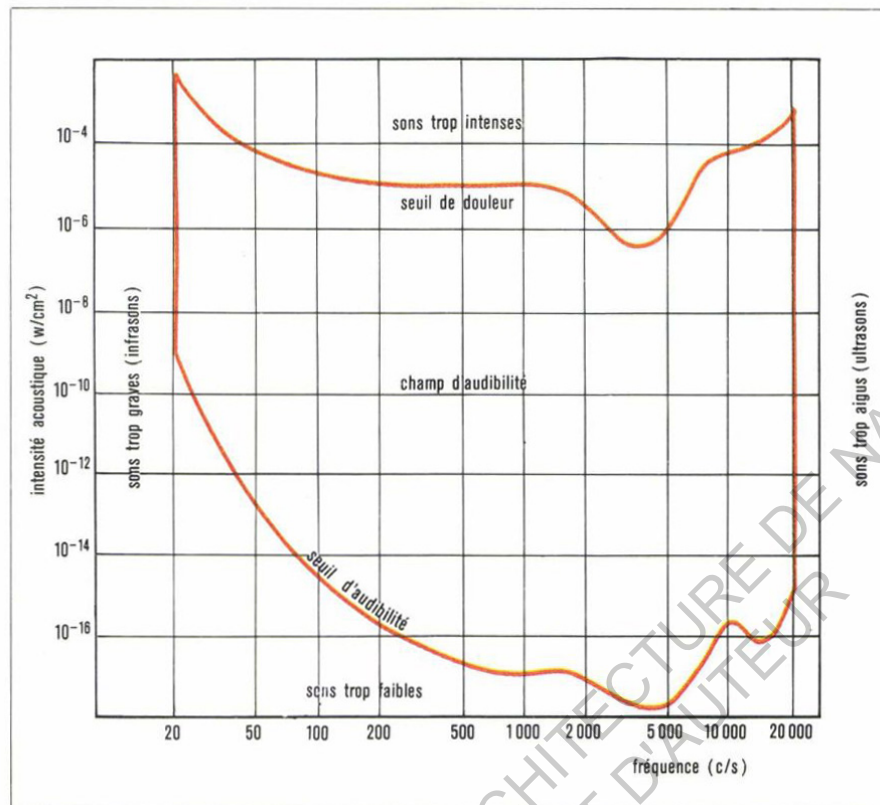
L'oreille est un récepteur logarithmique, on définit donc l'intensité en décibels, sachant que l'oreille humaine est capable de détecter des sons dont la variation est d'un facteur 10^{12} .

$$\bullet \quad I_{dB} = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ où } I_0 = 10^{-12} \text{W.m}^{-2}$$

La sensibilité des oreilles dépend cependant largement des fréquences émises, c'est pourquoi, il faut pondérer le ressenti de l'oreille en fonction des fréquences (courbes d'égales sensation).

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Champ d'audibilité.



47

Seuil d'audibilité

130 - 140 dB	Seuil intolérable
120 dB	Réacteur d'avion à 10 m
110 dB	Atelier de chaudronnerie
100 dB	Marteau-piqueur à 2 m
90 dB	Atelier de tissage
80 dB	Rue bruyante
60 dB	Conversation vive
50 dB	Musique douce
40 dB	Conversation normale
30 dB	Résidence tranquille
20 dB	Studio d'enregistrement
10 dB	Laboratoire d'acoustique
5 dB	Chambre muette

48

Ordres de grandeur

B. Liste des salles par ordre chronologique

Théâtre Farnese

Giovan Battista Aleotti
Parme
1628

Théâtre Tordinona*

Carlo Fontana
Rome
1670

Salle Esterhazy ou Haydnsaal

Carlo Martino Carlone
Eisenstadt
1663-1672

King's Theater*

John vanbrugh
London
1705

Holywell Music Room

Thomas Camplin
Oxford
1748

St-Cecilia's Hall

Robert Mylne
Edimbourg
1763

Teatro Comunale de Bologna*

Antonio Galli da Bibiena
Bologne
1763

Gewandhaus*

Johann Carl Friedrich Dauthe
Leipzig
1781

Grosser Musikvereinsaal

Theophil Hansen
Vienne
1870

Bayreuth Festspielhaus

Richard Wagner
Bayreuth
1876

Coliseu dos Recreios*

Maurício de Vasconcelos
Lisbonne
1890

Fogg Art Center**

Richard Morris Hunt
Cambridge, USA
1895

Symphonic Hall de Boston

Wallace Clement Sabine
Boston
1900

Salle Pleyel*

Gustave Lyon
Paris
1927

Flagey Studio 1

Joseph Diongre
Bruxelles
1938

Pavillon Philips**

Iannis Xenakis
Bruxelles
1958

Philharmonie de Berlin

Hans Scharoun
Berlin
1963

Jesse H. Jones' Hall for the performing arts

Caudill Rowlett Scott
Houston
1966

Pavillon allemand à Osaka**

Fritz Bornemann
Osaka
1970

Cité de la Musique

Christian de Potzamparc
Paris
1995

Palais de la culture et des congrès ou KKL

Jean Nouvel
Lucerne
1998

Vendespace

Agence Roulleau
La Roche sur Yon
2012

* Salles qui ont subi des modifications considérables

** Salles démolies

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Bibliographie

Asselineau, M. (2010)

Acoustique active et acoustique passive: approches complémentaires ou opposées?

10^e Congrès français d'acoustique,
Avril 2010, Lyon. 4 p.

Addis, B. (2009)

A Brief History of Design Methods for Building Acoustics

Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Mai 2009, Cottbus. 10 p.

Bennett, G. (1978)

La recherche à l'IRCAM en 1977

Disponible sur
<http://articles.ircam.fr/textes/Bennett78a/>

Bennett, G. (1979)

La recherche à l'IRCAM en 1978

Disponible sur
<http://articles.ircam.fr/textes/Bennett79a/>

Bennett, G. (1980)

La recherche à l'IRCAM en 1979

Disponible sur
<http://articles.ircam.fr/textes/Bennett80a/>

Combes, C. (2007)

L'IRCAM fête ses 30 ans: retour sur une institution culturelle atypique dans ses rapports avec ses organismes de tutelle

EHESS, janvier 2007.
Disponible sur
<http://musique.ehess.fr/document.php?id=237>

Forsyth, M. (1985)

Architecture et musique: L'architecte, le musicien et l'auditeur du XVII^e siècle à nos jours

Liège: Pierre Mardaga éditeur.

Galliari, A. (1994)

L'IRCAM en perspective

Disponible sur
<http://articles.ircam.fr/textes/Galliari94d/>

IRCAM

Qui sommes-nous?

Disponible sur
<http://www.ircam.fr/62.html>
[consulté en février 2016]

IRCAM. (2002)

Rapport d'activité

http://anasynth.ircam.fr/drupal6/sites/anasynth/files/publications/rapports_activites/AS_RapportActo2.html

IRCAM. (2003)

Rapport d'activité

http://anasynth.ircam.fr/drupal6/sites/anasynth/files/publications/rapports_activites/rappActivites03.html

IRCAM. (2004)

Rapport d'activité

http://anasynth.ircam.fr/drupal6/sites/anasynth/files/publications/rapports_activites/rappActivites04.html

IRCAM. (2014)

Rapport d'activité

http://www.ircam.fr/media/uploads/documents/rapports_activite/ra2014.pdf. p. 148-149

IRCAM. (2015)

Rapport d'activité

http://www.ircam.fr/media/uploads/documents/rapports_activite/ra2015.pdf. p. 159-160

Jouhaneau, J. (2009)

Guide méthodologique pour l'étude acoustique d'une salle – Approche systématique

Cahiers techniques de l'ingénieur.
Référence BR1010 V1. 11p.

Luizard, P. (2013)

Les espaces couples: comportement, conception et perception dans un contexte de salle de spectacle

Acoustics [physics.class-ph].
Université Pierre et Marie Curie – Paris VI.
French. <tel-00874238>

Mason, B. (1994)

Third music for a european concert hall

Extrait de la partition.
Chester Music Ltd. London.

Moorer, J. A. (1979)

About This Reverberation Business

Computer Music Journal, Volume 3, Number 2,
Juin 1979, 16 p.

Noisternig, M., Carpentier, T.,

Warusfel, O. (2010)

Espace de projection 2.0 – Implementation of a surrounding 350-Loudspeaker array for soundfield reproduction

Paris, France.

Solomos, M. (1998)

L'Espace Son

Jean-Marc Chouvel; Makis Solomos.

L'espace: musique, philosophie, L'Harmattan,
p. 211-224

Sterken S. (2004)

Iannis Xenakis, Ingénieur et Architecte

Thèse: Architecture and Urban Planning.

Gent Universiteit, 549 p.

Tingos, N., Warusfel, O. (2008)

Restitution sonore spatiale –

Dispositifs et interfaces

Cahiers techniques de l'ingénieur.

Référence TE5912 V1. 19p.

Xenakis, I. (2004)

Musique de l'architecture: textes, réalisations et projets architecturaux.

Paris: Éditions Parenthèses.

Audiographie

Barrett, N. (2012)

Optical Tubes

Disponible sur

<https://soundcloud.com/natashabarrett/>

optical-tubes-binaural

[consulté le 08/01/2017]

Gottfried, R. (2012)

Fluoresce

Disponible sur

<http://www.ramagottfried.com/fluoresce.html>

[consulté le 08/01/2017]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Fig. 1

Haydnsaal

Date inconnue,

Roland Wimmer

<http://esterhazy.at/images/uploads/3/d/0/3892176/>

Haydnsaal-0177Roland-Wimmer_LQ_1446456688113815-vo_h.jpg

Fig. 2

Robert Mylne, Saint Cecilia's Hall, Edimburgh

Date inconnue

Dessin

Paris-Sorbonne

<http://www.18thc-cities.paris-sorbonne.fr/>

St-Cecilia-s-Hall

Fig. 3

Saint Cecilia's Hall, Edimburgh

Photo de harleyHaddow

Photographie

<https://twicopy.org/Harleyhaddow/>

Fig. 4

Giovanni Battista Aleotti, Teatro Farnese, Parma

Date inconnue

Plan

<http://www.kvl.cch.kcl.ac.uk/THEATRON/theatres/farnese/assets/images/faring35.html>

Fig. 5

Giovanni Battista Aleotti, Teatro Farnese, Parma

Date inconnue

Coupe

<http://www3.northern.edu/wild/th100/chapt13a.htm>

htm

Fig. 6

Giovanni Battista Aleotti, Teatro Farnese, Parma

Date inconnue

Photographie, Vue intérieure

<https://visitparma.files.wordpress.com/2012/12/teatfarne02.jpg>

teatfarne02.jpg

Fig. 7

Fogg Center Auditorium.

Dessin de plan et coupe

https://www.researchgate.net/publication/228954144_Fogg_Art_Museum_Lecture_Room_A_calibrated_recreation_of_the_birthplace_of_Room_Acoustics

Acoustics

Fig. 8

Hans Scharoun. Vue intérieure de la salle du Philharmonie de Berlin,

Qobuzz. <http://www.qobuz.com/fr-fr/info/sur-scene/orchestre-philharmonique-de-berlin/1000-raisons-de-s-abonner-au173667>

Fig. 9

Hans Scharoun. Philharmonie de Berlin,

Coupe

http://1.bp.blogspot.com/-zrcM7PbhVUM/UWvm4bNzSrI/AAAAAAAAAa4/5qrOoRBUoXy/s1600/Filarmonica_corte_longitudinal.jpg

Filarmonica_corte_longitudinal.jpg

Fig. 10

Hans Scharoun. Philharmonie de Berlin,

Plan

http://3.bp.blogspot.com/-Cm5zgCj4Iqs/UWvm6by13dI/AAAAAAAAAbA/NPwnizv9BBg/s1600/Filarmonica_planta_sala.jpg

Filarmonica_planta_sala.jpg

Fig. 11 Vue intérieur du Pavillon d'Osaka

Moz

<http://www.moz.ac.at/sem/lehre/lib/es/tuberlin/History/chrono/1969-1970.html>

History/chrono/1969-1970.html

[consulté le 08/01/2017]

Fig. 12

Schémas de fonctionnement du Pavillon d'Osaka

Archiv der Stockhausen-Stiftung für Musik, Kürten

(www.karlheinzstockhausen.org)

[consulté le 08/01/2017]

Fig. 13

Jesse H. Jones Hall for the performing arts

Plans

http://cvc.cervantes.es/artes/paisajes_sonoros/p_sonoros03/chias_07.html

sonoros03/chias_07.html

[consulté le 08/01/2017]

Fig. 14

Flagey, Studio 1

Photo Bastien et Evrard

Vers 2002

Iris Monument http://www.irisonument.be/fr.Ixelles.Place_Eugene_Flagey.18.html#&gid=1&pid=20

fr.Ixelles.Place_Eugene_Flagey.18.html#&gid=1&pid=20

[consulté le 08/01/2017]

Fig. 15

KKL de Lucerne, schéma décrivant l'effet de couplage

Fig. 16

KKL de Lucerne, vue intérieure
Photographie
<https://wsdg.com/projects-items/kkl-concert-hall/>

Fig. 17

Plan d'organisation du Vendéspace
Peutz
<http://www.badminton2016.com/le-vendespace/>

Fig. 18

Vue intérieure du Vendéspace
Peutz
<http://www.peutz.fr/fr/content/le-vendespace>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 19

Renzo Piano, Bâtiment de l'IRCAM
Fondazione Renzo Piano
<http://www.fondazionerenzopiano.org/>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 20

Maquette de l'IRCAM
Fondazione Renzo Piano
<http://www.fondazionerenzopiano.org/>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 21

Vue intérieure de l'Espace de Projection
Fondazione Renzo Piano
<http://www.fondazionerenzopiano.org/>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 22

Périactes en maintenance
Photo
IRCAM
<http://web4.ircam.fr/1039.html>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 23

Dessins des périactes
Document personnel.

Fig. 27

Maquette du plafond
Fondazione Renzo Piano
<http://www.fondazionerenzopiano.org/>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 34

Positions des haut-parleurs dans l'Espace de Projection.
Noisternig, M., Carpentier, T., Warusfel, O. (2010).
Espace de Projection 2.0 – Implementation of a surrounding 350-Loudspeaker array for soundfield reproduction
Paris, France

Fig. 35

Système WFS. Bandes de haut-parleurs
Photo
IRCAM
<http://web4.ircam.fr/1039.html>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 36

Espace de Projection, plans du sol et du plafond.
Fondazione Renzo Piano
<http://www.fondazionerenzopiano.org/>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 37

Espace de Projection, élévations
Fondazione Renzo Piano
<http://www.fondazionerenzopiano.org/>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 38

Programme des travaux dans la salle de l'Espace de Projection
IRCAM. (2015). *Rapport d'activité*
http://www.IRCAM.fr/media/uploads/documents/rapports_activite/ra2015.pdf. p. 159-160

Fig. 39

Pierre Schoeller
Photo prise par Serge Lido
1951.
Syntone
<http://syntone.fr/les-neuf-voix-de-pierre-schaeffer/>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 40

Iannis Xenakis, Pavillon Philips
1958
Fondation Le Corbusier
<http://www.fondationlecorbusier.fr/>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 40

Plan du Pavillon Philips

Nicolas Dingman

<https://nicholasdingman.wordpress.com/2013/08/12/teamwork-philips-pavilion-case-study/>
[consulté le 08/01/2017]

Tous les tableaux proviennent du rapport Peutz référencé dans la bibliographie. (**Fig. 24 à Fig. 26** puis **Fig. 28 à Fig. 33**)

Fig. 42Iannis Xenakis, Plan d'organisation du *Terretektorh*

Orchestre en fête

<http://orchestresenfete.com/lemag/orchestre-en-cercle/>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 43Karlheinz Stockhausen, *Carré*

<http://www.overgrownpath.com/2012/02/is-dum-bing-up-classical-musics-next-big.html>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 44Pierre Boulez, *Répons* au Philharmonie de Paris

Photo de Luc Hossepied

<http://philharmoniedeparis.fr/fr/activite/concert-symphonique/14232-repons-de-pierre-boulez>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 45Emmanuel Nunes, *Quodlibet* à la Cité de la musique

Festival Music

<http://www.festivalmusica.org/edition/2007/manifestation/174>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 46

Schéma d'un système WFS

Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_field_synthesis
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 47

Seuil d'audibilité

Archives Larousse

<http://www.larousse.fr/archives/grande-encyclopedie/page/7143>
[consulté le 08/01/2017]

Fig. 48

Ordres de grandeur

Futura-Sciences

<http://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/medecine-bruit-effets-259/page/3/>
[consulté le 08/01/2017]

Imprimé à Nantes en janvier 2017

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Merci à

Mes parents pour leur aide

Mes colocataires et amis pour leur patience et soutien

Laurent Lescop et Bruno Suner pour leurs conseils et la liberté qu'ils m'ont laissée

Yann Robin pour l'intérêt qu'il a porté à ce mémoire

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

--	--	--