

Table des matières

Introduction	1
I Modélisation du théâtre d'Orange	3
Introduction	5
1 Présentation synthétique de l'architecture du théâtre d'Orange	7
1.1 Le <i>postscaenium</i> , les basiliques et le <i>pulpitum</i>	9
1.2 L' <i>orchestra</i> , les <i>aditi</i> et la <i>cavea</i>	11
1.3 Les couvertures et le <i>velum</i>	15
2 Modélisation	19
2.1 Méthodologie	21
2.2 La <i>cavea</i> et ses substructures	24
2.3 Les <i>maeniana</i>	28
2.4 Les <i>aditi</i> et les tribunes	30
2.5 Le mur de scène et ses basiliques	31
2.6 Le <i>pulpitum</i> et l' <i>orchestra</i>	34
2.7 Les couvertures du bâtiment de scène	34
2.8 La <i>porticus in summa cavea</i>	36
2.9 Les escaliers	37
2.10 La colline Saint-Eutrope	38
3 Applications	39
3.1 Le <i>velum</i>	40
3.2 Le rideau de scène	42
3.3 Les systèmes de particules	42
3.4 Autres projets ayant utilisé le modèle	43
Conclusion	45
Références	48
II Calculs acoustiques	49
Introduction	51
4 Acoustique de salle	53
4.1 Généralités sur l'acoustique de salle	54
4.2 Méthodes de calcul acoustique	60

5 Développement d'une méthode couplée	67
5.1 Notion d'onde sphérique discrétisée	69
5.2 Environnement géométrique	72
5.3 Calcul de rayons	74
5.4 Calcul de sources-images	78
5.5 Génération de réponse impulsionnelle	81
5.6 Auralisation	82
6 Optimisation algorithmique	85
6.1 Méthode d'octree	87
6.2 Analyse des résultats	92
7 Validation	97
7.1 Analyse visuelle	98
7.2 Décroissance quadratique	100
7.3 Cas de la salle sphérique	101
7.4 Cas de la salle cubique	102
8 Outil logiciel	107
8.1 Utilisation générique du logiciel	108
8.2 Paramètres de sortie	112
Conclusion	117
Références	121
III Analyse acoustique du théâtre d'Orange	123
Introduction	125
9 Analyse en configuration initiale	127
9.1 Configuration du maillage	128
9.2 Analyse de la réponse impulsionnelle	130
10 Test de configurations	135
10.1 Décor du front de scène	136
10.2 Position des spectateurs	136
10.3 La source et le mur de scène	138
10.4 Absorption des spectateurs et du <i>velum</i>	140
10.5 Les couvertures de la scène et de la <i>porticus in summa cavea</i>	140
11 Comparaison avec d'autres théâtres antiques	141
Conclusion	145
Références	147
A Annexes	I
A.1 Figures annexes	I
A.2 Tableaux annexes	XII
B Liste des acronymes	XV

C Glossaire

XVII

Troisième partie

Analyse acoustique du théâtre d'Orange

Introduction

Il est d'usage de prétendre que l'acoustique des théâtres antiques est excellente et que le son, par de simples astuces géométriques, est bien perçu à toutes les places. Il est bon de constater que les romains adaptaient leurs architectures aux usages des bâtiments. Ainsi on pourra distinguer les théâtres antiques des *odéons* qui, plus petit et complètement fermés avaient un usage exclusivement musical. Les romains ainsi que les Grecs ont choisi de bâtir un type de bâtiment adapté aux représentations théâtrales et ont reproduit de manière assez similaire cette architecture globale en différents lieux. Quelles étaient donc les astuces architecturales permettant d'optimiser la propagation du son sachant que "les architectes [de l'antiquité] n'ont jamais disposé que de deux moyens : la géométrie et l'oreille"⁹? On sait par ailleurs que l'acoustique faisait parti des préoccupations des architectes puisque Vitruve, contemporain de l'époque Augustéenne en fait régulièrement dans son livre V.¹⁰. François Canac, a mené durant de nombreuses années une large étude théorique et expérimentale sur l'acoustique des théâtres antiques¹¹. Il explique que la l'excellente acoustique des théâtres antiques tel que celui d'Orange est dû à plusieurs facteurs géométriques :

- L'orchestre qui fonctionne comme un miroir et réfléchi le son provenant de la scène vers les gradins.
- Le mur de scène qui réfléchi également le son vers les gradins. Pour que ce son réfléchi ne soit pas présent sous forme d'écho (ce qui nuirai grandement à la compréhensibilité) il est nécessaire que la scène soit peu profonde. Effectivement, un écho apparaît op.
- Par ailleurs des murs de scène s'élevaient presque toujours là où le terrain arrière était horizontal avec donc la possibilité de présenter des bruits parasites. Le mur semble donc avoir un rôle de "parason"¹².
- L'angle des gradins qui augmente en générale lorsqu'on s'éloigne de la scène et qui permet à tous les spectateurs de bénéficier des réflexions sur l'orchestre¹³.
- Le caractère simple de la géométrie : des murs très réfléchissants des gradins à ciel ouvert permettant la présence de premières réflexions et peu de réverbération¹⁴.
- Le *pulpitum* qui présente des niches alternativement rectangulaires et semi-circulaire (mais qui est plat dans les *odéons*) pourrait servir soit à disperser les échos nuisibles soit à faire résonner la musique¹⁵.

9. [CANAC, 1967, p.15]

10. [MAUFRAZ, 1847, Livre V]

11. [CANAC, 1967, oeuvre intégrale]

12. [CANAC, 1967, p.38]

13. [CANAC, 1967, p.103-109]

14. [CANAC, 1967, p.33]

15. [CANAC, 1967, p.38]

-
- Les gradins doivent permettre à l'acteur de s'entendre en retour afin d'avoir la sensation que sa voix porte ¹⁶

L'un des caractère essentiel de l'étude acoustique dans un théâtre est la compréhensibilité. Cependant, ne disposant que de peu de données dans ce domaine, nous n'étudierons pas ce paramètre en profondeur. Effectivement, l'usage de la parole dans les représentations théâtrales est difficile à comprendre. Outre le fait que l'élocution était probablement très différente de celle qu'on connaît aujourd'hui (Aristote ¹⁷ et Plutarque ont insisté sur l'entraînement rigoureux des acteurs pour développer leur voix et leur aisance sur scène ¹⁸) les acteurs portaient probablement des masques amplificateurs pour amplifier leur voix ¹⁹. Il est rapporté par Philostrate dans *La vie d'Apollonios de Tyane*, V, 9 "qu'un acteur tragique se rendit en Occident et y fit une tournée ... Arrivé à Hypsalis (Seville) il sembla aux indigènes déjà effrayant par son aspect, cbien qu'il n'eût pas encore prononcé une parole sur la scène. En le voyant marcher à grand pas, la bouche démesurément ouverte, monté sur des chaussures d'une hauteur extraordinaire, le corps dissimulé sous un étrange accoutrement, ces gens, n'étaient pas rassurés; mais quand il se mit à éléver la voix et à déclamer sur un ton éclatant, la plupart prirent la fuite, comme poursuivis par les cris d'un démon. Il résulte donc de ce passage que la voix atteignait une sonorité considérable" ²⁰. Il n'est pas impossible que certains spectacles de théâtre aient été non verbaux et plutôt de type pantomime. Nous restreindrons donc notre étude au critère de clarté **C₈₀**.

Dans ce chapitre nous allons tenter d'aller plus loin dans l'analyse acoustique des théâtres antiques en utilisant des outils numériques. Effectivement, nous disposons désormais d'une maquette virtuelle du théâtre d'Orange ainsi que d'un outil de simulation acoustique, nous allons donc pouvoir combiner les deux pour tester différentes hypothèses archéologiques. Quelle était l'impact de la position des spectateurs dans les gradins? Le toit ou le *velum* avaient-ils une incidence sur le son perçu? Quels rôles jouent et jouaient les différents matériaux? Voici quelques exemples auxquels nous tenterons d'apporter des réponses. Le premier chapitre présente comment utiliser le logiciel de calcul acoustique et comment le paramétriser pour la maquette virtuelle du théâtre d'Orange. Des calculs seront ensuite effectués pour différentes configurations du théâtre afin de tenter d'éclairer certaines hypothèses de reconstitution. Nous verrons dans un contexte plus général comment se situe le théâtre d'Orange par rapport à d'autres théâtres en termes d'acoustique.

16. [CANAC, 1967, p.42 - tab.II-4]

17. [BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE, 1838, Chap IV - XIV]

18. [CANAC, 1967, p.39]

19. [ARNAUD, 1808, p.362]

20. [FORMIGÉ, 1923, p.43]

Chapitre 9

Analyse en configuration initiale

« Les idées sont comme des êtres vivants. Elles naissent, elles croissent, elles prolifèrent, elles sont confrontées à d'autres idées et elles finissent par mourir. »

Bernard Werber

Sommaire

9.1 Configuration du maillage	128
9.2 Analyse de la réponse impulsionale	130

9.1 Configuration du maillage

Pour effectuer les tests nous mettons en place une configuration de référence. Celle-ci sera détaillée et étudiée dans ce chapitre tandis que le chapitre suivant présentera l'impact des différents éléments sur l'acoustique du bâtiment. Nous pourrons alors procéder de manière relative en ôtant les éléments les uns après les autres pour constater leur impact. Cette configuration de référence est un parti pris de ce que nous pensons être le théâtre dans un état d'usage standard de représentation, c'est-à-dire restitué de manière quasi-complète, avec du public et sans *velum*. Il est important de noter que cette configuration intègre des éléments hypothétiques (tel que de toit de la scène par exemple) mais dont l'aspect et la présence sont probables d'après ce que nous avons vu dans la partie I. Cette configuration de référence est donc composée : du mur de scène et d'une partie de sa décoration (les colonnes, les *podia* et les entablements), de l'*orchestra*, de la scène et de sa couverture, des basiliques, des *aditi* et de la *cavea* ainsi que de la *porticus in summa cavea* (voir fig. 9.1). On ajoute également les trois grandes portes du *postscaenium* ainsi que les diverses niches qui ont été modélisées (voir Chap. 2.5) sur le front de scène. Ceux sont les éléments qui peuvent avoir un impact non négligeable sur l'étude acoustique. Nous pouvons noter que le maillage ainsi constitué comporte environ 160 000 triangles. Notons également que le décor du front de scène est légèrement déraffiner grâce au modifier "Decimate" afin d'alléger le maillage. Les tests acoustique auront tous lieu à l'intérieur du bâtiment, ainsi, certains éléments situés à l'extérieur de l'enceinte ont été ôtés du modèle tels que les arcades autour de la *cavea*, les mâts de *velum*, etc. Le calcul complet pour atteindre 60dB d'atténuation se fait en environ 12 minutes sur un ordinateur portable ce qui permet d'enchaîner un nombre important de tests.

En ce qui concerne les matériaux, nous avons tenté de se rapprocher de la réalité d'après les éléments disponibles aujourd'hui. Tous les éléments construits en grand appareil sont en calcaire de Courthezon¹. L'orchestre était à priori dallé avec un matériau de type marbre². On utilisera également du marbre pour le front du *pulpitum*, le décor du front de scène et la *porticus in summa cavea*. Le front de scène, derrière sa décoration était orné de panneaux mêlant probablement du marbre varié et polychrome ainsi que des mosaïques, nous lui assignerons donc également un matériau de type marbre. Le plancher de la scène, les portes du *postscaenium* ainsi que les couvertures de la scène et de la *porticus in summa cavea* étaient à priori en bois (probablement du chêne pour ses propriétés mécaniques et sa présence régionale). Notons que seules les faces donnant vers l'intérieur du théâtre nous importent, c'est pourquoi nous ne traiterons pas des matériaux recouvrant les toitures. Enfin, la configuration initiale se fait avec le public puisque c'est le cas d'utilisation le plus courant. Nous assignons donc aux gradins un matériau de type audience tout comme aux trois degrés bas situés sur l'orchestre et réservés au Sénateurs. Ceux-ci ne font pas partie de la modélisation décrite en partie I car il s'agit de siège mobiles pour lesquels nous ne disposons que de peu d'information. "Dans les théâtres de Rome les sénateurs étaient placés immédiatement avant les chevaliers. Or, à Orange, la place des chevaliers est déterminée par une inscription deux fois répétée sur le premier gradin inférieur du premier *maenianum* : EQjG-III. Il fallait donc que les décurions fussent avant eux, c'est-à-dire sur les gradins de l'orchestre"³. Dans la base de donnée Odéon⁴ on trouve les matériaux qui se rapprochent le plus de ceux évoqué pré-

1. [BADIE et collab., 2013, p.43]

2. [BADIE et collab., 2013, p.337]

3. [FORMIGÉ, 1923, p.46]

4. [ODEON, materials]

cédemment et on obtient les coefficients d'absorption correspondant (voir tab. 9.1). Ce qui saute aux yeux dans ce tableau c'est que le calcaire et le marbre sont extrêmement réfléchissant et semble tenir une fonction de miroir acoustique. A contrario le public est plutôt absorbant et on imagine que son rôle sera de limiter les échos. Quant au bois, il absorbe moyennement les basses fréquences et peu les hautes fréquences.

Matériau	Réf	Equivalent Odéon	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
Calcaire	1001	Smooth brickwork with flush pointing ⁵	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	0.07
Marbre	2001	Marble or glazed tile ⁶	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Bois	3000	Hollow wooden podium ⁷	0.4	0.4	0.3	0.2	0.17	0.15	0.1	0.1
Public sur gradins	11009	Audience, lightly upholstered seats ⁸	0.51	0.51	0.64	0.75	0.8	0.82	0.83	0.83
Public sur sièges mobiles	11003	Audience on wooden chairs, 1 per sq.m ⁹	0.16	0.16	0.24	0.56	0.69	0.81	0.78	0.78

TABLEAU 9.1 – Matériaux et les coefficients d'absorption correspondant du théâtre d'Orange

On peut voir sur la figure 9.1 la répartition des différents matériaux sur le bâtiment. Nous plaçons une source sonore centrée sur la largeur de la scène à 160cm au dessus de celle-ci (environ la hauteur d'une bouche humaine) soit à une altitude de 42,8m et à 2m du bord. Nous choisissons cette position comme position de source initiale. Le récepteur initial est situé dans le même axe, c'est à dire au centre des gradins et à la même altitude. Sa distance par rapport au centre de l'orchestre est de 16,5m, ce qui correspond aux gradins 3 à 8 environ. Son rayon de mesure sera de 2m.

8. Bobran, 1973

7. Harris, 1991

6. Dalenbäck, CATT

7. Beranek, Hidaka, 1998

8. Meyer, Kunstmann, Kuttruff, 1964

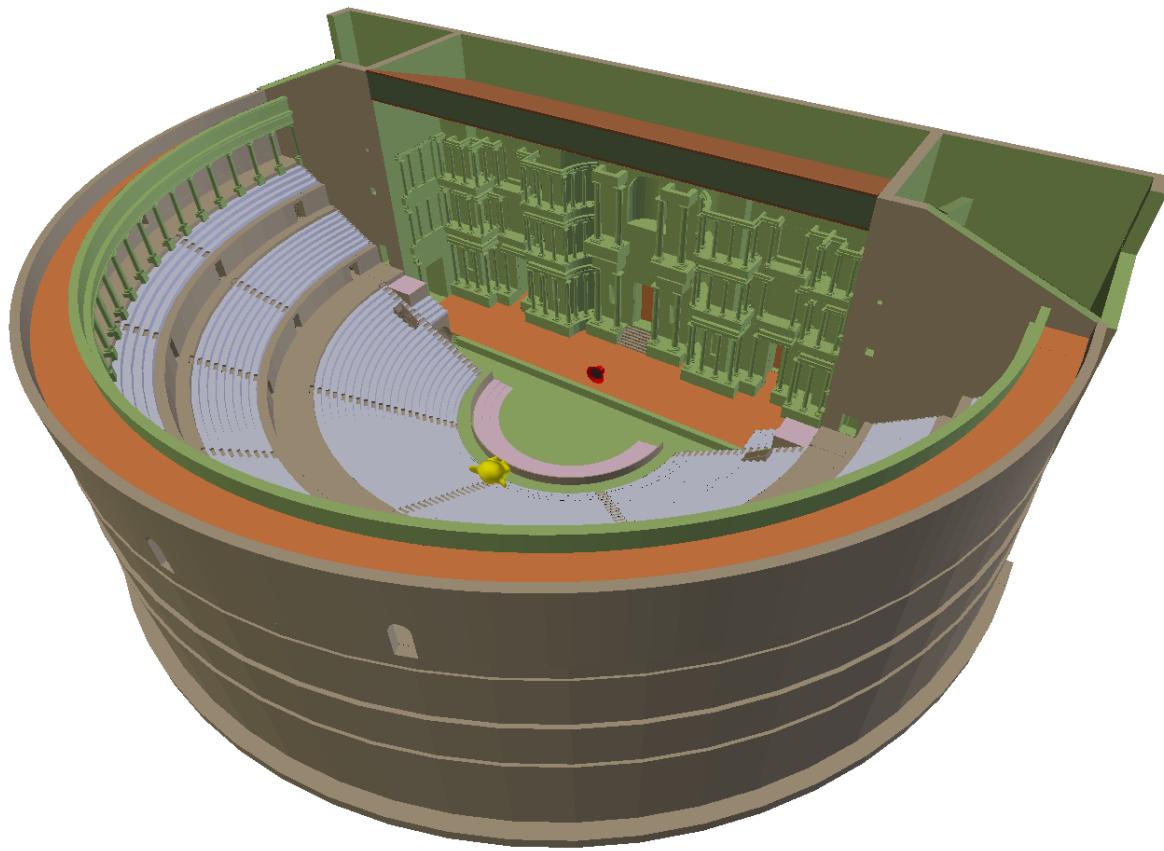


FIGURE 9.1 – Représentation des matériaux sur le théâtre d'Orange : Calcaire (beige), Marbre (vert), Bois (orange), Audience sur gradins (gris), Audience sur siège en bois (rose) ainsi que la source (rouge) et le récepteur (jaune) dans la configuration initiale.

9.2 Analyse de la réponse impulsionnelle

La figure 9.2 et le tableau 10.1 illustrent les caractéristiques de la réponse impulsionnelle de la configuration initiale. On constate un temps de réverbération à 60dB (RT_{60}) de l'ordre de est atteint en 3 secondes environ. Grâce aux figures ?? et ?? nous allons pouvoir analyser d'où proviennent les pics d'énergies les plus forts. Pour cela, nous nous appuyons sur les travaux de Haas et Meyer⁹ qui expliquent à quel moment une réflexion devient un écho :

- si l'intervalle entre le son direct et le son réfléchi est inférieur à 5ms, l'auditeur entend un son unique dont l'intensité est la somme des deux signaux. La direction perçue est la bissectrice de l'angle formé par les deux sources (réelle et virtuelle) ;
- si le temps entre les deux signaux est compris entre 5 et 35ms, l'intensité est encore la somme des intensités mais la direction est celle du premier signal ;
- si le temps entre les deux signaux est compris entre 35 et 50ms, les deux signaux sont distingués dans le temps mais la direction semble être celle du premier son ;
- au delà de 50ms, les deux signaux sont complètement distingués dans le temps et l'espace.

Sur la figure 9.2c on constate la présence d'un pic de signal 5ms après le son direct ce qui entre dans le premier cas décrit précédemment. Après analyse, nous constatons que

9. [HAAS, 1951, p.49]

celui-ci provient de la réflexion du l'orchestre. L'orchestre va donc doubler l'intensité sonore émise depuis l'avant scène. Sur la figure 9.2b nous constatons qu'il y a ensuite beaucoup de signal dispersé sur environ 30ms qui correspond aux rayons réfléchis sur le dossier des gradins et qui reviennent converger sur le récepteur (voir fig 9.4b). La une partie d'entre eux se sont également réfléchis sur l'orchestre ajoutant encore à l'impact de cette surface dallée. D'après les critères évoqués précédemment, ces signaux sont parfaitement confondus avec le son direct. Il y a ensuite un trou de 20ms avant les prochains pics. Ceux-ci étant retardés de plus de 50ms par rapport au son direct, ils pourront être perçus comme un écho. Ceux-ci proviennent des réflexions sur les marches d'escalier de la porte royale. À 160ms les quelques pics présents sont dû à la réflexions sur les gradins qui, bien que fortement atténusés par le matériau arrivent en phase et jouent donc un rôle non négligeable dans la réverbération.

Il y a ensuite un grand pic à -12dB qui est créé par la niche voutée centrale et qui joue le rôle d'un miroir convergeant sur le récepteur. Celui-ci est retardé de plus de 35ms ce qui implique qu'il est entendu en écho bien que sa direction soit plutôt assimilée aux dossiers des gradins. Les pics postérieurs sont le résultat de la forme semi-circulaire de la *cavea* (voir fig. ??) qui renvoie les rayons vers le récepteur. Le dernier pic de la figure 9.2b semble être dû aux réflexions sur le bas de la porte royale et la scène. On considérera qu'au-delà nous serons dans le champs diffus.

La tableau 10.1 présente les facteurs perceptifs de cette configuration initiale. On constate clairement que le théâtre semble particulièrement bien adapté à la transmission de parole puisque plutôt qu'à la musique. Effectivement, la définition **D₅₀** est au-delà de 75% ce qui permet de comprendre que la contribution des premières réflexions est largement majoritaire sur le champs diffus. De même, la clarté **C₈₀** est élevée (on dit que pour la musique elle doit se situer entre -3dB et +3dB ¹⁰), or ici elle est supérieure à 7dB dès les plus basses fréquences ce qui préside d'une très bonne compréhensibilité de la parole. Le temps central **T_s** étant inférieur à 50ms, on comprend que globalement la réverbération sera quasi-confondue avec le son direct. Par ailleurs, on voit que le théâtre amplifie de 4dB les basses fréquences et 3dB les hautes fréquences. On retrouve bien l'analyse faite précédemment sur l'orchestre qui double le niveau sonore de la source.

Facteur	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
EDT (ms)	1626	1612	1409	1298	1239	962	594	374
T₃₀ (ms)	3327	3267	2974	2908	2616	2226	1402	670
RT₆₀ (ms)	2633	2633	2520	2456	2456	2079	1393	611
SPL (dB)	-32	-32	-33	-33	-33	-34	-36	-42
G (dB)	5.6	5.6	5.2	5	4.8	4.5	4	3.1
C₈₀ (dB)	3.32	3.35	3.93	4.32	4.67	5.51	7.49	12.64
D₅₀ (%)	57.51	57.67	59.65	60.7	62.05	65.45	73.06	87.16
T_s (ms)	89	88	78	73	67	54	34	13
LF₈₀ (dB)	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001

TABLEAU 9.2 – Facteurs perceptifs pour une source en [0; 5.6; 42.8] et un auditeur en [0; -16.5; 43.9] et 1000000 rayons dans la configuration de référence.

A partir de cette analyse pour allons pouvoir procéder par comparaison avec cette configuration initiale pour déterminer l'impact des modifications apportées au bâtiment sur l'acoustique.

10. [KRAUSS et collab., 2009, p.59]

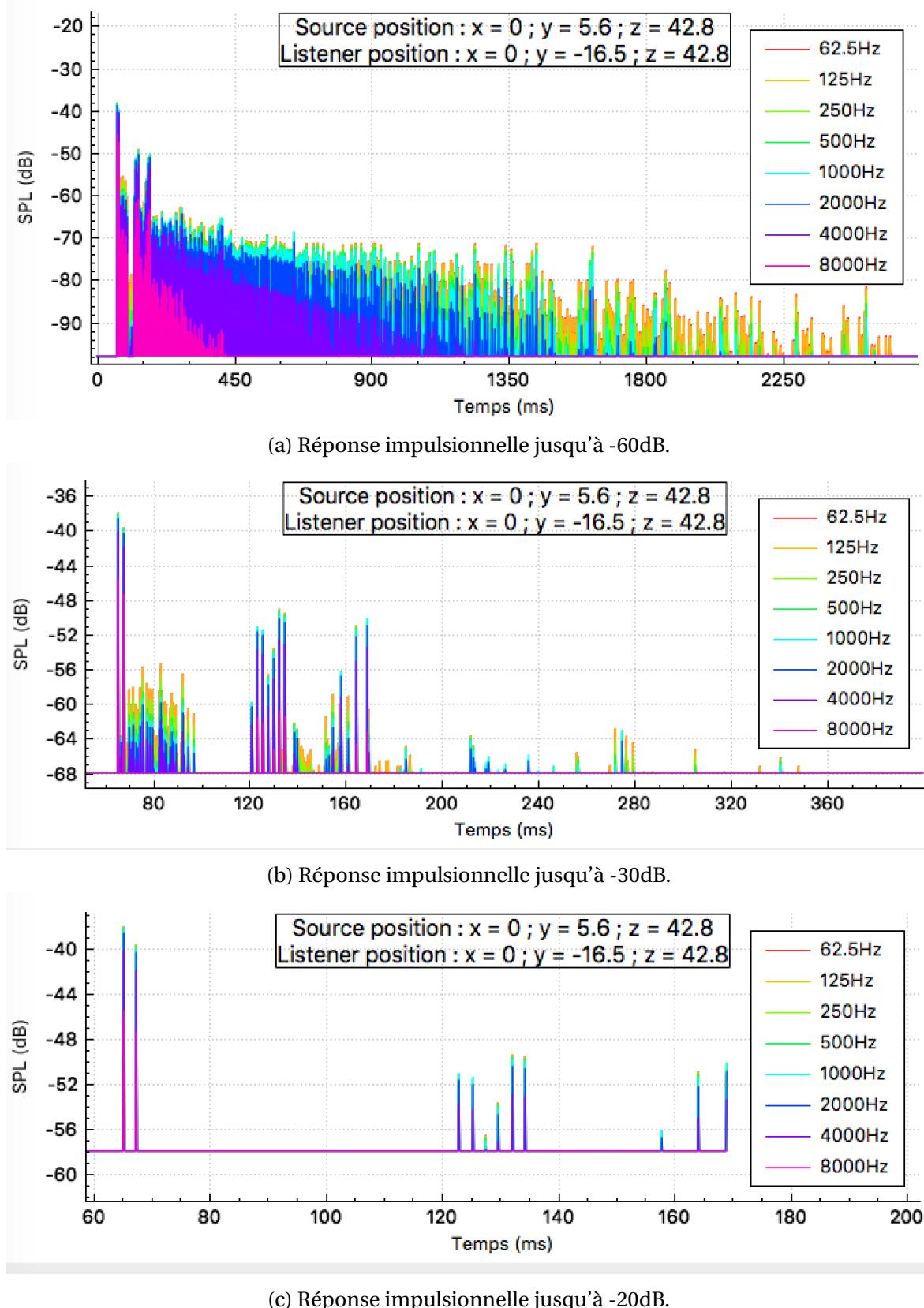
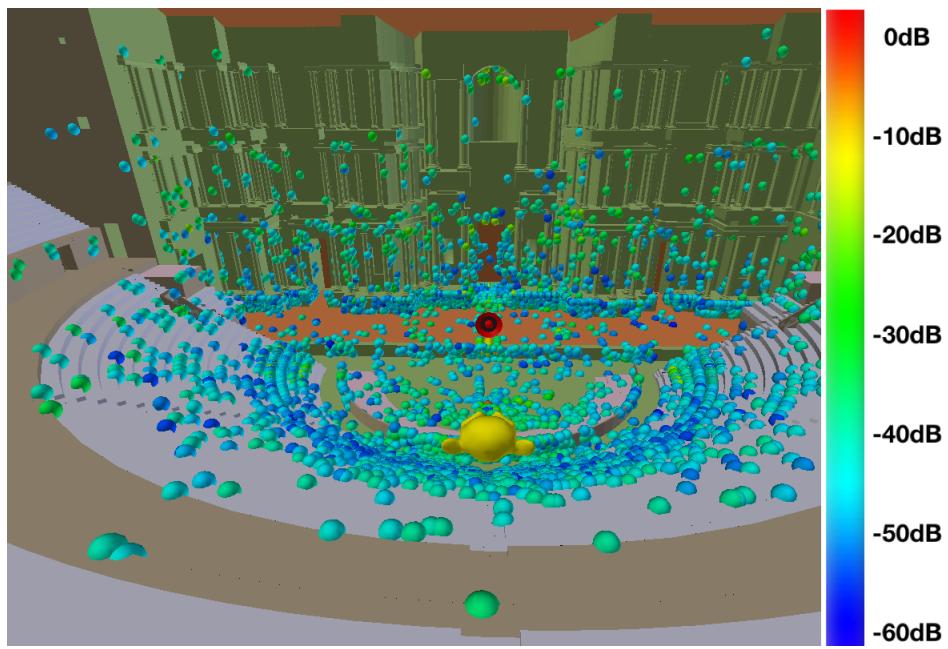
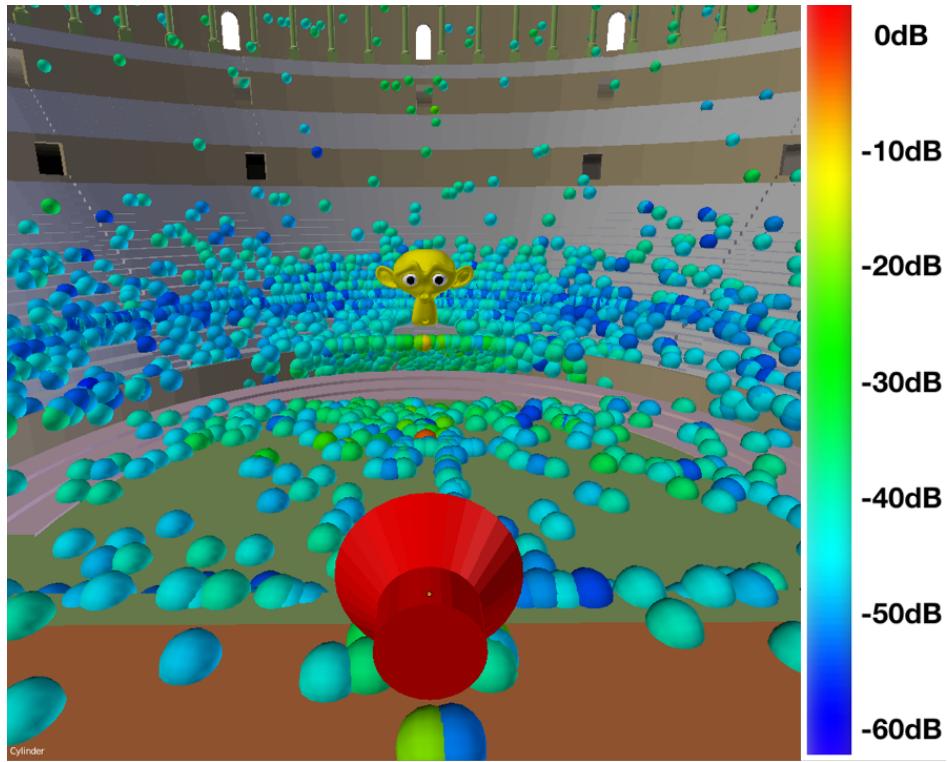


FIGURE 9.2 – réponse impulsionnelle d'une salle, ou *Room Impulse Response* (RIR) du théâtre d'Orange dans sa configuration initiale pour 1 million de rayons.

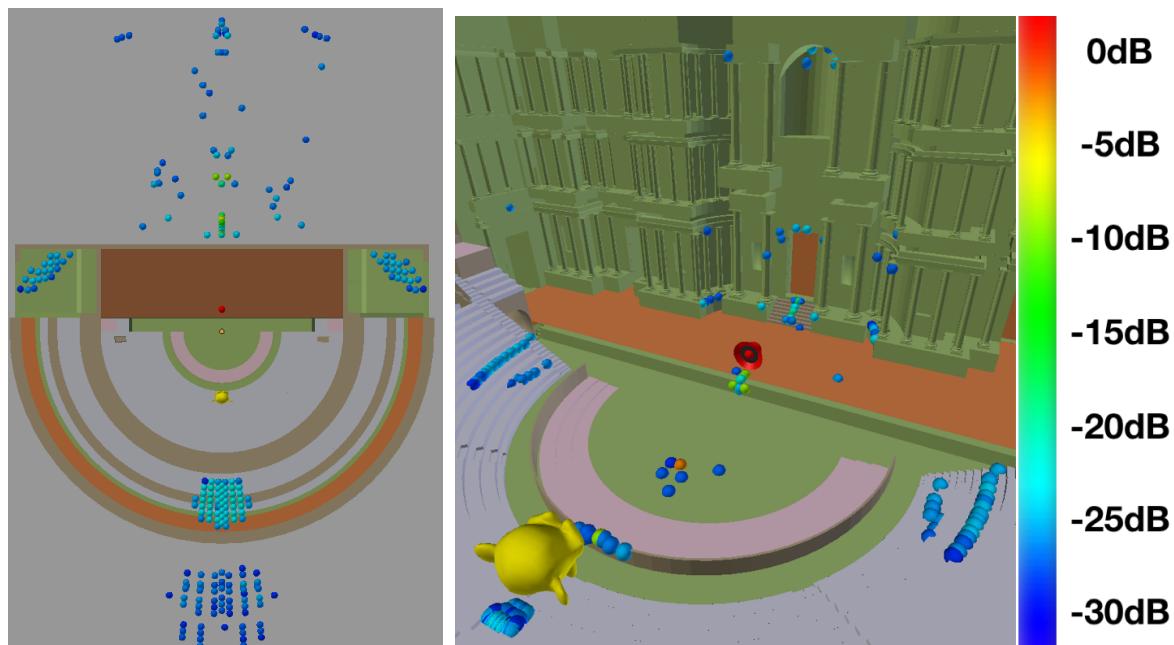


(a) Source-images projetées sur les parois du théâtre jusqu'à -60dB vu des gradins.



(b) Source-images projetées sur les parois du théâtre jusqu'à -60dB vu de la scène.

FIGURE 9.3 – Source-images dans le théâtre d'Orange dans sa configuration initiale pour 1 million de rayons.



(a) Source-images spatialisées jusqu'à -30dB.
(b) Source-images projetées sur les parois du théâtre jusqu'à -30dB.

FIGURE 9.4 – Source-images dans le théâtre d'Orange dans sa configuration initiale pour 1 million de rayons.

Chapitre 10

Test de configurations

« *Don't stop me now
I'm having such a good time* »

Queen

Sommaire

10.1 Décor du front de scène	136
10.2 Position des spectateurs	136
10.3 La source et le mur de scène	138
10.4 Absorption des spectateurs et du <i>velum</i>	140
10.5 Les couvertures de la scène et de la <i>porticus in summa cavea</i>	140

10.1 Décor du front de scène

Comme nous l'avons évoqué en introduction de ce chapitre, l'acoustique du théâtre d'Orange a déjà été étudié par F.Canac dans les années 60. Le problème de cette étude est qu'elle se base sur le théâtre tel qu'il existe aujourd'hui, c'est à dire dépouillé de l'ornementation du front de scène. Pour pouvoir comparer nos résultats à cette étude, nous ôtons la décoration du mur de scène ainsi que la *porticus in summa cavea* pour mesurer la réponse impulsionnelle du théâtre dans un état proche de celui d'aujourd'hui.

Facteur	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
EDT (ms)	684	684	600	419	219	190	125	18
T₃₀ (ms)	2048	2046	1774	1598	1437	1300	1109	439
RT₆₀ (ms)	1776	1776	1776	1658	1286	1140	903	571
SPL (dB)	-34	-34	-34	-34	-35	-35	-37	-43
G (dB)	4.3	4.3	3.9	3.6	3.5	3.4	3.2	2.9
C₈₀ (dB)	7.28	7.31	8.53	9.91	11.06	11.52	13.75	18.69
D₅₀ (%)	82.61	82.7	85.68	88.27	90.15	90.88	93.68	97.43
T_s (ms)	38	38	28	21	17	15	10	5
LF₈₀ (dB)	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

TABLEAU 10.1 – Facteurs perceptifs pour une source en [0; 5.6; 42.8] et un auditeur en [0; -16.5; 43.9] et 1 000 000 de rayons sans décoration du front de scène.

Il est intéressant de constater que ce temps est proche du temps de réverbération optimal pour la parole décrit par J.Jouhaneau ¹ et qui se trouve être légèrement inférieur à 2s. Ce dernier est obtenu à partir des courbes de pourcentage d'intelligibilité et de niveau sonore qui se croisent en ce point optimal. Effectivement, la réverbération d'une salle permet d'amplifier le niveau sonore de la voix, donc d'être mieux entendue mais, lorsque le signal se diffuse plus longtemps, il devient plus difficile de dissocier et comprendre les mots. Ce temps optimal est empirique et discutable puisque J.Jouhaneau décrit lui-même les limites de cette analyse dépendant du volume et du signal émis ². Cette faculté à transmettre correctement les discours parlés est corroboré dans l'étude de F.Canac ...

10.2 Position des spectateurs

La première étape de ces tests comparatifs se fait sur la position des spectateurs. Nous savons que le placement dans la *cavea* se faisait selon le rang social des spectateurs. Nous comprenons facilement que visuellement, les spectateurs les plus proches étaient ceux qui voyait le mieux les acteurs même ceux situés légèrement en recul avaient une meilleure vu d'ensemble. Ainsi vous avions les sénateurs sur des sièges mobiles dans l'orchestre.

Nous testons donc 12 nouvelles positions d'auditeur afin de comparer le signal perçu avec la RIR de référence (voir fig. 10.1). Nous positionnons des séries d'auditeurs sur des axes à 0°, 55° et à 90° (au dessus des *aditi*) par rapport à la perpendiculaire au mur de scène. Sur chaque de ces axes, on positionne des récepteurs sur les derniers gradins des chaque *maenianum* et pour les axes n'étant pas au niveau de l'*aditus* on ajoute également

1. [JOUHANEAU, 1997, p.209]
2. [JOUHANEAU, 1997, p.218]

des récepteurs au niveau des premiers gradins et de ceux de l'orchestre. On notera que le récepteur 10 est situé sur la tribune occidentale. On constate d'après le tableau 10.2

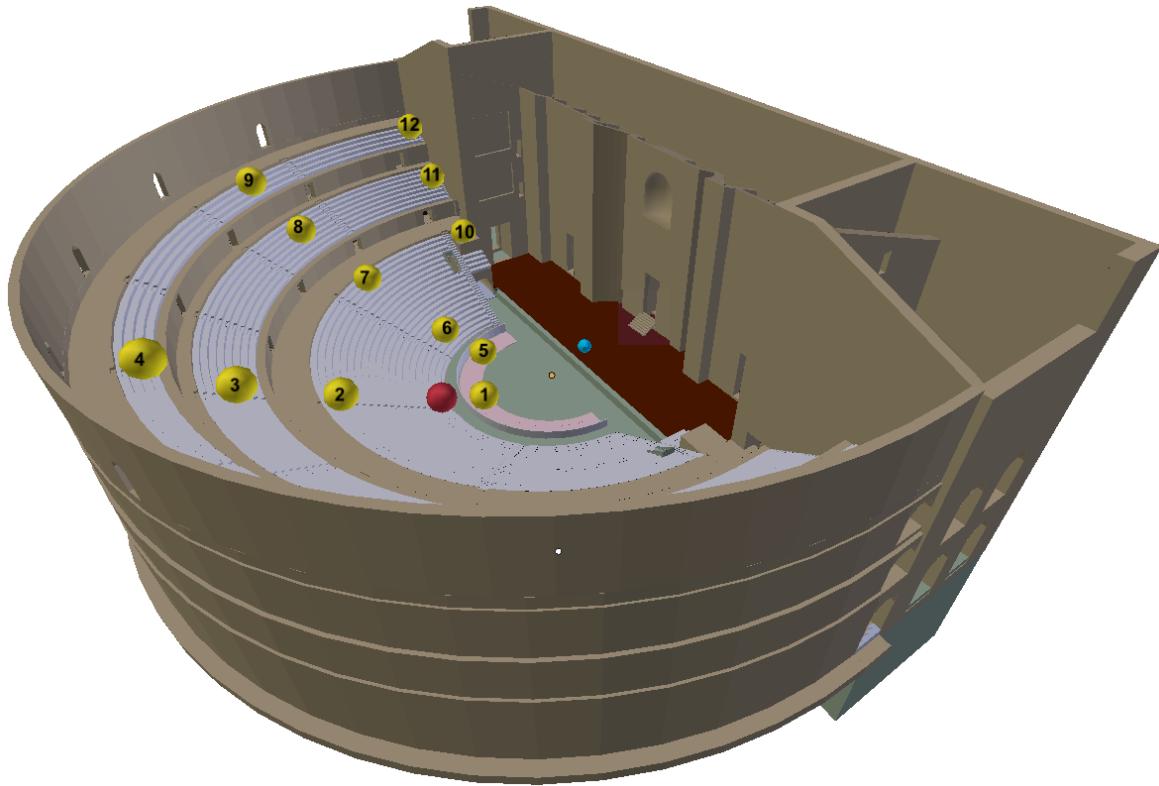


FIGURE 10.1 – Douze positions d'auditeurs (jaune) à comparer à la position initiale (rouge).

plusieurs choses. Tout d'abord, le niveau acoustique **SPL** diminue de 3dB entre les gradins mobiles de l'orchestre réservés aux sénateurs et les premiers gradins accessibles aux classes moins élevées tels que les chevaliers. Le son est donc entendu deux fois moins fort. La perte est de 10dB au sommet de la *cavea* ce qui implique que les classes les plus modestes entendaient le son de la scène dix fois moins fort que les sénateurs de l'orchestre. En ce qui concerne la compréhensibilité, on distinguera les trois axes.

- Pour l'axe perpendiculaire au mur de scène (récepteurs 1 à 4), la clarté (**C₈₀**) et la définition (**D₅₀**) reste bien adaptées à un signal audio de type texte. Le temps de réverbération double entre les premiers et derniers gradins ce qui dégrade légèrement ces paramètres. Néanmoins, le temps central (**T_s**) restant inférieur à 50ms, on conserve un phénomène d'échos faible.
- Le long de l'axe décalé de 55° (récepteurs 5 à 9), le temps central (**T_s**) se décale beaucoup plus loin (jusqu'à 136ms pour les derniers gradins) ce qui implique une moins bonne compréhensibilité. Effectivement lorsque l'auditeur n'est pas bien dans l'axe, le signal se réfléchi sur les cotés de la *cavea* (notamment sur les murs lisses tels que les *podia*) ce qui ajoute beaucoup de signal au champs diffus.
- Dans le troisième axe (récepteurs 10 à 12) cet effet est encore amplifié puisque le son se réfléchi sur les **basiliques**. Le temps de réverbération est plus important au niveau de la tribune car cet auditeur bénéficie de nombreuses réflexions sur le mur de scène que les auditeurs du deuxième et troisième *maenianum* n'ont pas. On constate alors que sur cet axe, l'acoustique n'est plus vraiment adaptée à la parole mais plutôt à la musique.

Récepteur	[x; y; z] (m)	EDT (ms)	T ₃₀ (ms)	SPL (dB)	C ₈₀ (dB)	D ₅₀ (%)	T _s (ms)
1	[0; -10.67; 41.44]	611	1466	-31	8.2	86.51	28
Réf	[0; -16.5; 43.9]	419	1598	-34	9.91	88.27	21
2	[0; -28.23; 50.02]	739	1614	-38	8.64	85.77	32
3	[0; -37.86; 55.92]	510	2093	-40	8.05	81.77	36
4	[0; -44.36; 62.06]	503	2932	-42	5.84	79.34	43
5	[-8.74; -6.12; 41.44]	578	1616	-29	8.78	76.2	35
6	[-13.51; -9.46; 43.86]	948	1816	-32	7.96	66.12	46
7	[-23.12; -16.19; 50.02]	1389	1855	-36	5.71	55.93	74
8	[-31.02; -21.72; 55.92]	1473	2280	-39	4.01	63.49	87
9	[-36.34; -25.44; 62.06]	2056	2116	-41	1.61	59.15	136
10	[-28.23; 1.66; 50.02]	1760	4445	-34	1.77	60.03	100
11	[-37.87; 1.66; 55.92]	2575	3399	-38	1.82	52.97	141
12	[-44.36; 1.66; 62.06]	2564	2663	-39	0.56	46.76	179

TABLEAU 10.2 – Facteurs perceptifs pour différents récepteurs sur la bande de fréquence de 500Hz pour 1 000 000 de rayons.

Le paramètre **LF₈₀** (dB) n'apparaît pas dans le tableau 10.2 car la valeur reste toujours très faible (<0,1dB) conséquence du fait que le son provenant de la scène est grandement majoritaire.

Pour résumer, les spectateurs les plus éloignés entendait le son jusqu'à dix fois moins fort. Plus on se rapproche de l'axe central de la *cavea*, plus l'acoustique est favorable à la parole tandis que lorsqu'on s'approche de l'axe des *aditi* l'acoustique est plus favorable à la musique.

10.3 La source et le mur de scène

Au théâtre d'Orange il est probable que les sources sonores étaient composés d' ... (à completer) ainsi leur directionnalité semble plutôt orienté vers le public et non vers le mur de scène. La fonction du mur semble donc dans un premier être décorative et isolante. Effectivement la structure complètement enclavante du théâtre coupe les spectateurs des bruits extérieurs. Par ailleurs la décoration détaillée du front de scène apporte inévitablement un effet de diffusion des fréquences audibles. Néanmoins, on peut explorer l'impact de la forme caractéristique du mur de scène sur la réflexion du son. Cette dernière est liée est la position de la source sonore. La figure 10.2a montre les rayons se propageant vers le mur de scène et revenant vers les spectateurs (dans le plan à 1m60 au dessus de la scène). On constate que le mur autour de la porte centrale renvoi des rayons dans les gradins tandis que l'*exèdre* curviligne ainsi que ses têtes renvoient les rayons vers les tribunes. La figure 10.2b représente le même test pour une source située sur l'axe entre les portes latérales menant aux *parascaenia* c'est-à-dire à Y=9m. On constate dans ce cas que l'*exèdre* curviligne permet de concentrer une partie des rayons sur les extrémités de la *cavea*. De la même manière, grâce aux figures 10.2c et 10.2d, on constate bien que plus on s'éloigne du bord de la scène, plus l'*exèdre* concentre les rayons vers l'axe central de la *cavea*. On voit d'ailleurs sur la figure 10.2d que lorsque la source est sur l'escalier de la porte royale, (quasiment dans l'encadrement), les rayons reviennent de part et d'autre de l'escalier central de la *cavea*.

Si on se place maintenant dans le plan vertical YZ (ou vu de profil). Nous avons vu précédemment que la reflexion sur l'orchestre est très importante puisqu'elle permet de renvoyer une grande partie des rayons vers les gradins. Cependant, plus la source va s'éloigner

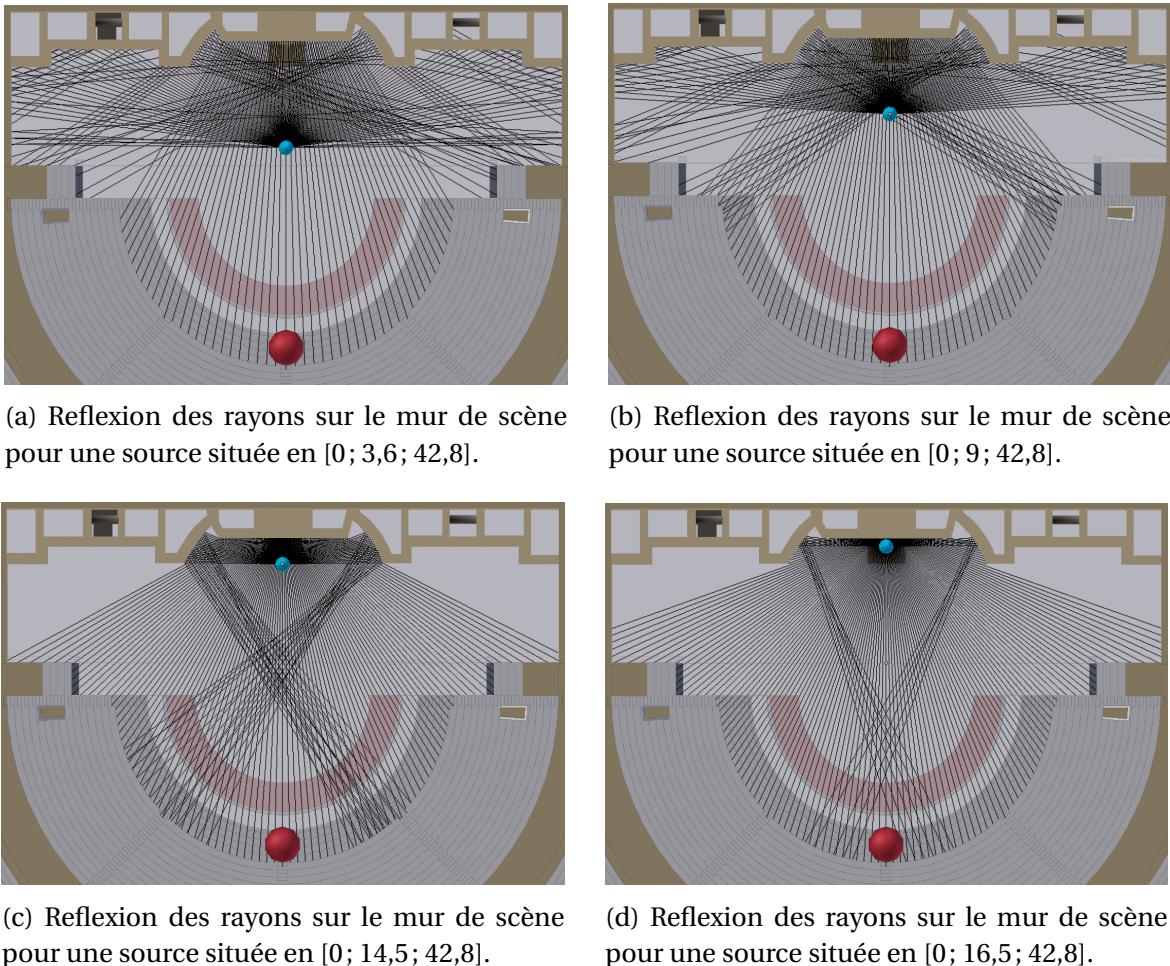


FIGURE 10.2 – Reflexion des rayons propagés depuis une source vers le mur de scène dans un plan horizontal.

gner du bord de la scène moins il y aura de rayons réfléchis sur l'orchestre. Les rayons sont alors réfléchis sur la scène qui possède des coefficients d'absorption plus élevés. On peut alors calculer la distance d de l'orchestre qui va réfléchir des rayons en fonction de la distance d' de la source sur la scène par rapport au bord (voir fig 10.3). D'après le théorème de Thales on a :

$$d = \frac{h'}{h} \times d' = 1,33d', \quad (10.1)$$

où :

- h est la hauteur de la scène (1,2m à Orange),
- h' est la hauteur de la source sur la scène (1,6 m en prenant en compte la taille moyenne d'un acteur).

Ainsi, lorsque que l'acteur s'éloignera du bord de la scène de 1m, les reflexions se feront sur 1,33m de moins sur l'orchestre. On note par ailleurs les escaliers de la porte royale se trouvent à 11m du bord de la scène; lorsque l'acteur sera à cette position, les rayons ne toucheront l'orchestre qu'à 14,63m du bord de la scène ce qui tombe en plein dans les gradins mobile. Un acteur se trouvant en fond de scène ne bénéficiera donc pas de la reflexions sur l'orchestre pour amplifier le son.

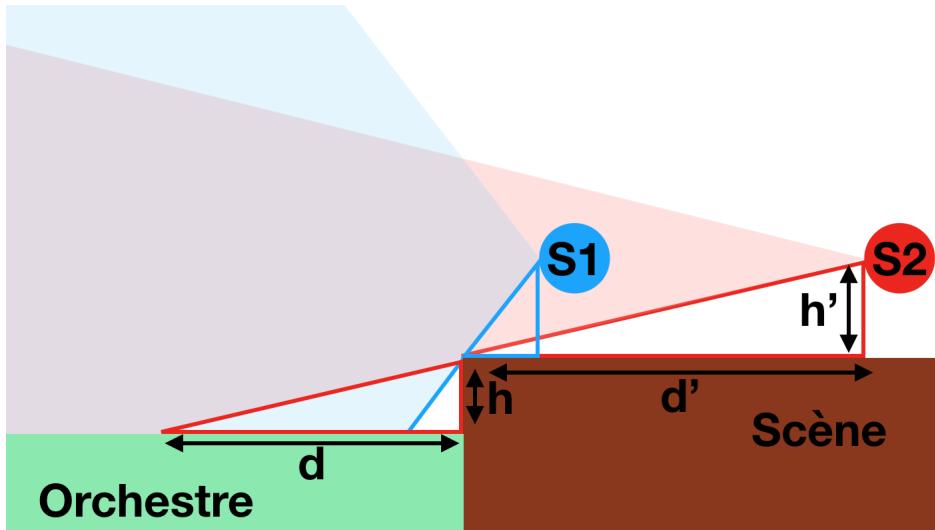


FIGURE 10.3 – Vu de profil de la propagation sonore à partir de deux sources S1 et S2. Proportion de signal réfléchi sur l'orchestre plus faible pour S2 que pour S1.

10.4 Absorption des spectateurs et du *velum*

³

10.5 Les couvertures de la scène et de la *porticus in summa cavea*

3. [JOUHANEAU, 1997, p.212]

Chapitre 11

Comparaison avec d'autres théâtres antiques

*« Si on veut connaître un peuple, il
faut écouter sa musique »*

Platon

Citer ¹

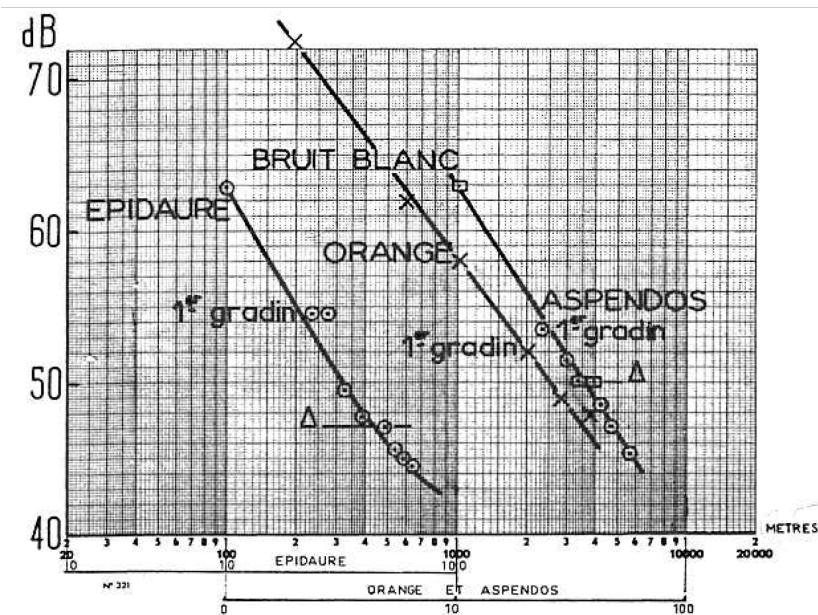


FIGURE 11.1 – Comparaison de l'intensité perçue entre les théâtre d'Epidaure, Aspendos et Orange ².

1. [RINDEL, 2013, p.25]
2. [CANAC, 1967, p.162]
3. [CANAC, 1967, p.152]
4. [CANAC, 1967, Fig. V-7 bis - p.119]
5. [CANAC, 1967, Fig. V-7 - p.118]

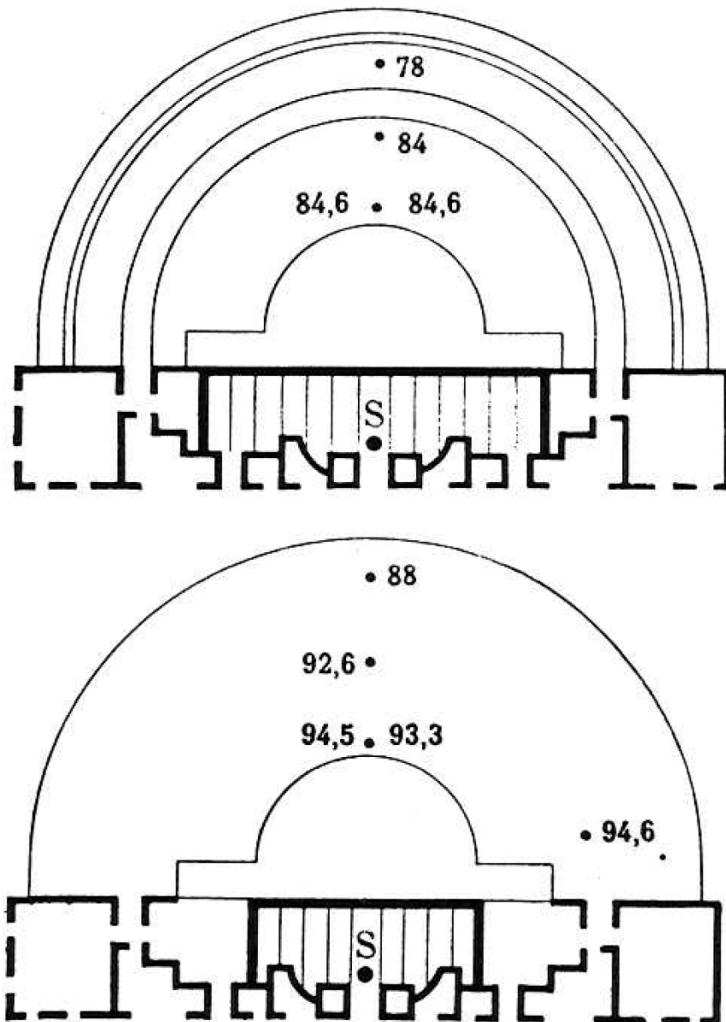
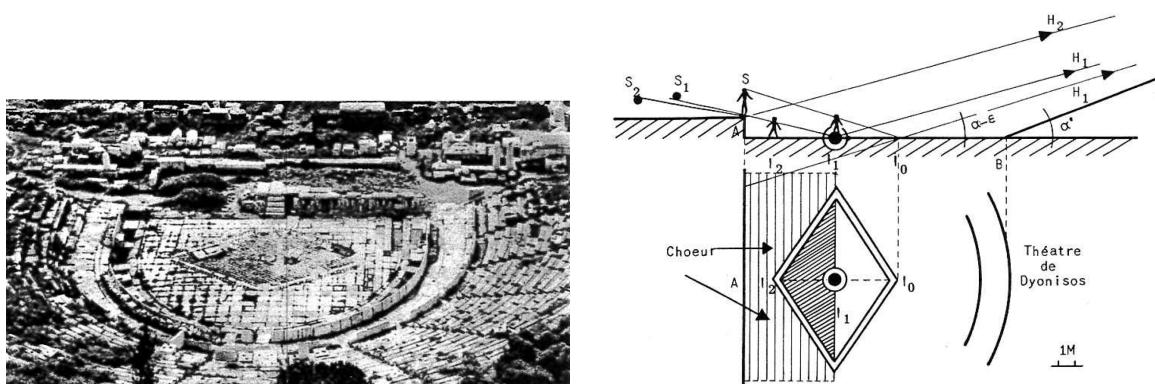


FIGURE 11.2 – Comparaison de la compréhensibilité à Orange, avec un mur (en haut) et à Vaison, sans mur (en bas)³.



(a) Mosaïque en losange dans l'orchestre du théâtre de Dyonisos à Athènes⁴.

(b) Rôle supposé du losange dans l'orchestre du théâtre de Dyonisos. Emplacement du chœur⁵.

FIGURE 11.3 – Analyse de l'orchestre du théâtre de Dyonisos à Athènes.

Conclusion

Références

- ARNAUD, A. 1808, *Oeuvres complètes*, vol. Tome III, L'imprimerie de Valade. [126](#)
- BADIE, A., M. FINCKER, J.-C. MORETTI, L. RABATEL, E. ROSSO et D. TARDY. 2013, «Le théâtre d'orange - rapport final d'opération - texte», cahier de recherche. PACA Vaucluse, Orange Théâtre antique 84 087 0031 - Patriarche 9827 n2012-203. [128](#)
- BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE, J. 1838, *Livre de la Poétique d'Aristote*, Ladrange. [126](#)
- CANAC, F. 1967, *L'acoustique des théâtres antiques. Ses enseignements*, Éditions du centre national de la recherche scientifique, 15, quai Anatole-France - Paris VII. [125](#), [126](#), [142](#)
- FORMIGÉ, J. 1923, *Remarques diverses sur les théâtres romains, à propos de ceux d'Arles et d'Orange, Sujets divers d'érudition*, vol. 13, Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des inscriptions et belles-lettres de l'Institut de France. [126](#), [128](#)
- HAAS, H. 1951, *Influence de l'écho sur la compréhension de la parole*, vol. 1, Acoustica. [130](#)
- JOUHANEAU, J. 1997, *Acoustique des salles et sonorisation, Acoustique appliquée*, vol. 3, Conservatoire national des arts et métiers. [136](#), [140](#)
- KRAUSS, G., R. YEZOU et F. KUZNIK. 2009, «Acoustique du bâtiment», Cours-Institut national des sciences appliquées de Lyon. [131](#)
- MAUFRAS, M. C.-L. 1847, *Vitrue : De l'architecture*, vol. V, Panckoucke. [125](#)
- ODEON. «Odeon webpage», URL <https://odeon.dk/>. [128](#)
- RINDEL, J. H. 2013, «Roman theatres and revival of their acoustics in the erato project», *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, vol. 99, p. 21–29. [142](#)

Annexe B

Liste des acronymes

- C₈₀** Désigne les propriétés acoustiques d'une salle où les détails de l'image sonore sont aisément perceptibles. On l'obtient par le calcul du rapport exprimé en décibels entre une impulsion sonore perçue à la position d'écoute pendant les 80 premières milli-secondes divisée par l'énergie perçue après 80ms. [132](#), [134](#)
- D₅₀** Exprime le degré de séparation acoustique d'un son par rapport à un autre. [132](#), [134](#)
- EDT** **RT₆₀** exprimé à partir de l'extrapolation de l'énergie entre -0 et -10dB, ou *Early Decay Time*. [132](#), [134](#)
- G** Gain acoustique. [132](#)
- LF₈₀** Exprime le rapport de l'énergie parvenant latéralement à la source pendant l'intervalle de temps de la réponse impulsionale compris entre 5ms et 80ms sur celle lui parvenant de toutes les directions pendant les 80 premières millisecondes de la réponse impulsionale. [132](#), [134](#)
- RIR** Réponse impulsionale d'une salle, ou *Room Impulse Response*. [130](#), [134](#)
- RT₆₀** Temps de réverbération pour que l'énergie diminue de 60dB, ou *Reverberation Time at 60dB*. [130](#), [132](#), [134](#), [XV](#), [XVI](#)
- SPL** Niveau de pression acoustique, ou *Sound Pressure Level*. [132](#), [134](#)
- T₃₀** **RT₆₀** exprimé à partir de l'extrapolation de l'énergie entre -5 et -35dB. [132](#), [134](#)
- T_s** Exprime le centre de gravité temporel de la réponse impulsionale de la salle, c'est à dire le temps pour lequel la moitié de l'énergie sonore totale est reçue. [132](#), [134](#)

Annexe C

Glossaire

ADITUS Portes conduisant de l'extérieur à l'*orchestra*. [i](#), [128](#), [XVIII](#), [XIX](#)

BASILIQUE Large pièce de forme quasi-carré qui flanque le mur de scène et les *parascae-nium*. [i](#), [XIX](#)

CAVEA Désigne l'ensemble des rangées concentriques composant les gradins. [i](#), [128](#), [131](#), [134](#), [XVII-XIX](#)

KEYFRAME Marqueur temporelle stockant la valeur d'un paramètre. [XVII](#)

MAENIANUM Portions de la cavea séparées par un *podium* et rassemblant un ensemble de gradins. [i](#), [128](#), [XIX](#)

ODÉON Petit théâtre couvert dédié exclusivement aux spectacles musicaux. [125](#)

ORCHESTRA Espace semi-circulaire (chez les romains) ou circulaire (chez les Grecs) se situant entre la scène et le premier gradin. [i](#), [128](#), [XVII](#), [XIX](#)

PARASCAENIUM Espace intermédiaire entre la scène et les **basiliques** comportant des escaliers pour atteindre les niveaux supérieurs. [XVII](#)

PARTICULE L'outil physique "Système de Particules" est utilisé lorsque l'on veut émettre quelque chose depuis un objet en quantité importante. Ces particules peuvent ensuite être soumise à des effets physiques pour simuler des cheveux, de la fumée, du feu ou autres. [i](#)

PODIUM Massif de maçonnerie élevé au-dessus du sol et servant de soubassement. [XVIII](#)

PORTICUS IN SUMMA CAVEA Arcade bordée de colonnes située au dessus du troisième *maenianum*. [i](#), [ii](#), [128](#), [133](#), [135](#), [XVIII](#)

POSTSCAENIUM Mur séparant la scène de l'extérieur comportant des salles pouvant servir de coulisses. [i](#)

PULPITUM Ensemble de l'estrade sur lequel jouent les acteurs orné en son front par un petit mur de marbre décoré. [i](#), [125](#), [128](#)

VELUM Grande pièce de tissu généralement en lin tirée au dessus de la *cavea* pour protéger les spectateurs du soleil. [i](#), [126](#), [XVII](#)

VOMITORIUM Issues permettant aux spectateurs d'accéder aux gradins. [XIX](#)