

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	35
2.8 La <i>porticus in summa cavea</i>	36
2.9 Accès aux tribunes par les <i>aditus</i>	38
2.10 La colline Saint-Eutrope	38
3 Applications	41
3.1 Le <i>velum</i>	42
3.2 Les systèmes de particules	45
3.3 Autres projets ayant utilisé le modèle	46
Conclusion	49
Références	52
II Calculs acoustiques	53
Introduction	55
4 Acoustique de salle	57
4.1 Généralités sur l'acoustique de salle	58
4.2 Méthodes de calcul acoustique	63

5 Développement d'une méthode couplée	71
5.1 Notion d'onde sphérique discrétisée	73
5.2 Environnement géométrique	76
5.3 Calcul de rayons	78
5.4 Calcul de sources-images	82
5.5 Génération de réponse impulsionale	86
5.6 Auralisation	86
6 Optimisation algorithmique	89
6.1 Méthode d'octree	91
6.2 Analyse des résultats	96
7 Validation	101
7.1 Analyse visuelle	102
7.2 Décroissance quadratique	104
7.3 Cas de la salle sphérique	105
7.4 Cas de la salle cubique	106
8 Outil logiciel	111
8.1 Utilisation générique du logiciel	112
8.2 Paramètres de sortie	116
Conclusion	121
Références	125
I Analyse acoustique du théâtre d'Orange	1
Introduction	3
1 Analyse en configuration initiale	5
1.1 Configuration du maillage	6
1.2 Analyse de la réponse impulsionale	8
2 Test de configurations	15
2.1 Décor du front de scène	16
2.2 Position des spectateurs	17
2.3 La source et le mur de scène	20
2.4 Présence de spectateurs	25
2.5 Les couvertures	25
Conclusion	29
Références	34
A Annexes	I
A.1 Figures annexes	I
A.2 Tableaux annexes	XII
A Liste des acronymes	I
B Glossaire	III

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. Mythe ou réalité? On peut dans tous les cas 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 musical¹⁰. 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"¹¹? On sait par ailleurs que l'acoustique faisait parti des préoccupations des architectes puisque Vitruve, contemporain de l'époque Augustéenne en fait régulièrement état dans son *De architectura* livre V.¹². François Canac, a mené durant de nombreuses années une large étude théorique et expérimentale sur l'acoustique des théâtres antiques¹³. Il explique que 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.
- Les 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"¹⁴.
- 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'orchestre¹⁵.
- Le caractère simple de la géométrie : des murs très réfléchissants des gradins à ciel ouvert permettant la présence de premières réflexions et peu de réverbération¹⁶.
- 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 musique¹⁷.

10. [VASSILANTONOPoulos et MOURJOPoulos, 2009, p.1]

11. [CANAC, 1967, p.15]

12. [MAUFRAS, 1847, Livre V]

13. [CANAC, 1967, oeuvre intégrale]

14. [CANAC, 1967, p.38]

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

16. [CANAC, 1967, p.33]

17. [CANAC, 1967, p.38]

-
- Les gradins doivent permettre à l'acteur de s'entendre en retour afin d'avoir la sensation que sa voix porte¹⁸.

L'un des caractère essentiel de l'étude acoustique dans un théâtre est la compréhensibilité. Nous ne disposons pourtant que de peu d'information dans ce domaine. Premièrement, il n'est pas impossible que certains spectacles de théâtre aient été non verbaux et plutôt de type pantomime. Par ailleurs, 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 (Aristote¹⁹ et Plutarque ont insisté sur l'entraînement rigoureux des acteurs pour développer leur voix et leur aisance sur scène²⁰) les acteurs portaient probablement des masques amplificateurs pour amplifier leur voix²¹. 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 Hyspalis (Seville) il sembla aux indigènes déjà effrayant par son aspect, bien 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 considérable²². C'est donc avec ces réserves que nous tenterons de comprendre comment la voix pouvait être transmise à l'aide de critères tels que la clarté **C₈₀** (voir section 8.2).

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. Quel 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. Cette troisième partie commence par la présentation de la configuration initiale de la maquette virtuelle du théâtre d'Orange et de son analyse. Des calculs seront ensuite effectués pour différentes configurations du théâtre afin de les comparer aux résultats de référence et ainsi d'éclairer certaines hypothèses de reconstitution. Nous verrons finalement dans un contexte plus général comment se situe le théâtre d'Orange par rapport à d'autres théâtres en terme d'acoustique.

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

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

20. [CANAC, 1967, p.39]

21. [ARNAUD, 1808, p.362]

22. [FORMIGÉ, 1923, p.43]

Chapitre 9

Analyse en configuration initiale

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

Platon

Sommaire

1.1 Configuration du maillage	6
1.2 Analyse de la réponse impulsionnelle	8

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. 1.1). On ajoute également les trois grandes portes du *postscaenium* ainsi que les diverses niches qui ont été modélisées sur le front de scène (voir Chap. 2.5). Ce 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 **modificateur de type "Décimer"** 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 model tels que les arcades autour de la *cavea*, les mâts de *velum*, etc.

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 a 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 a priori en bois (probablement du chêne pour ses propriétés mécaniques et sa présence régionale)³. 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 Séateurs. Dans la base de donnée d'Odéon⁴ on récupère les matériaux qui se rapprochent le plus de ceux évoqués précédemment et on obtient les coefficients d'absorption correspondant (voir tab. 1.1). Ce qui saute aux yeux dans ce tableau c'est que le calcaire et le marbre sont extrêmement réfléchissant et semblent 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. Notons également que nous assignons aux ambulacres un matériau 100% absorbant afin d'éviter que des rayons ne se perdent dans les couloirs sans en ressortir, ce qui rallongerait le temps de calcul.

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

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

3. [FORMIGÉ, 1923, p.34 et 43]

4. [ODEON, materials]

Matériaux	Réf	Équivalent 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 1.1 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.

Nous testons le calcul complet avec un et deux millions de rayons. Nous constatons que les résultats sont quasiment identiques à partir de 500Hz mais que les temps de réverbération sont un peu plus grands pour les basses fréquences à deux millions de rayons (moins de 10% d'écart). Cela s'explique par le fait que l'atmosphère ainsi que les matériaux atténuent très peu ces fréquences. Cependant, ce faible écart de résultats reste acceptable compte tenu de la diminution du temps de calcul. Il est de 17min pour deux millions de rayons et 8min pour un million. Nous testons aussi le calcul pour 500 000 rayons dont le temps est de 3min et retrouvons des résultats identiques à la configuration à deux millions de rayons seulement au delà de 4kHz. Pour les plus basses fréquences l'écart va jusqu'à 17%. Nous choisissons donc de travailler avec un million de rayons.

8. Bobran, 1973

7. Harris, 1991

6. Dalenbäck, CATT

7. Beranek, Hidaka, 1998

8. Meyer, Kunstmann, Kuttruff, 1964

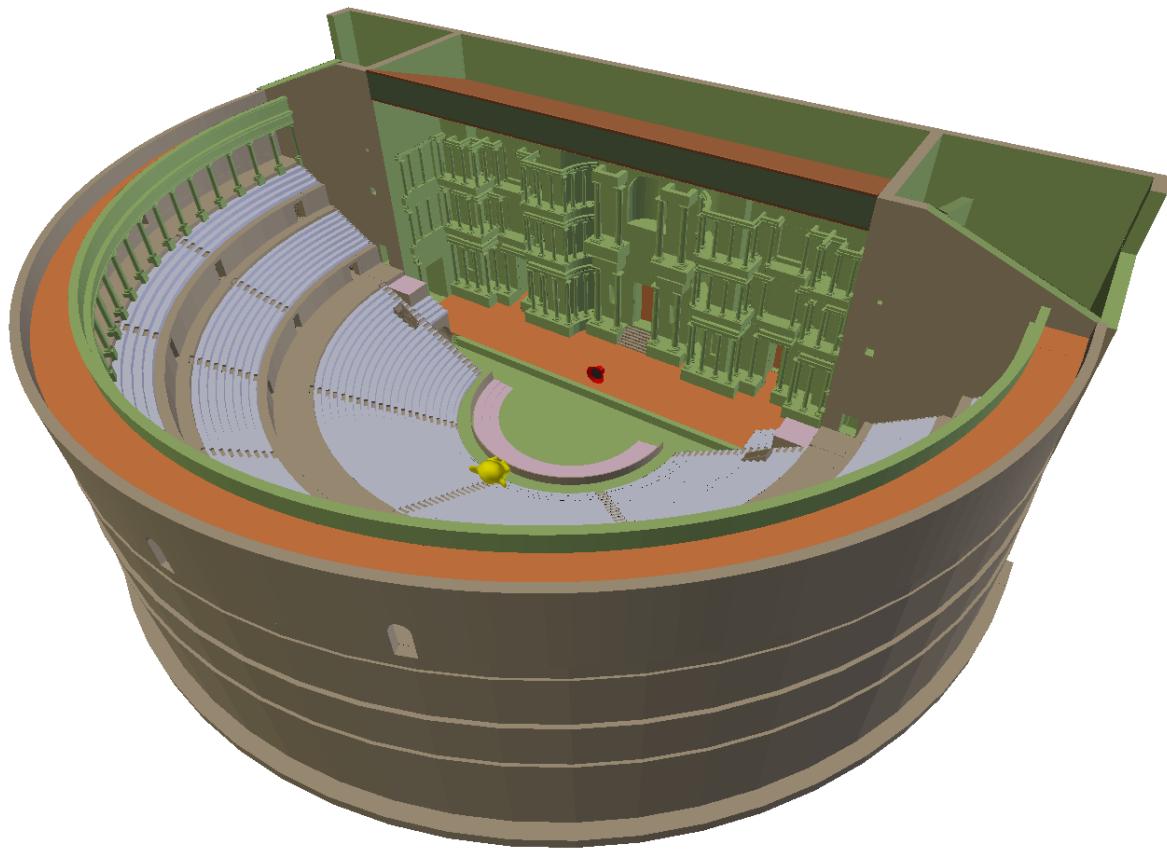


FIGURE 9.1 – Représentation des matériaux sur le théâtre d'Orange : Calcaire (beige), Marbre (vert), Bois (orange), Audience sur gradins (gris), Audience sur siège en bois (rose) ainsi que la source (rouge) et le récepteur (jaune) dans la configuration initiale.

9.2 Analyse de la réponse impulsionale

La figure 1.2 et le tableau 1.2 illustrent les caractéristiques de la réponse impulsionale de la configuration initiale. On constate une zone de premières réflexions jusqu'à 400ms puis une chute d'énergie pour le champs diffus qui s'étale au delà des 3 secondes pour atteindre le temps de réverbération à 60dB (RT_{60}). Grâce aux figures 1.2b et 1.2c 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 1.2c on constate la présence d'un pic de signal 5ms après le son direct ce

9. [HAAS, 1951, p.49]

qui entre dans le premier cas décrit précédemment. Après analyse, nous constatons que celui-ci provient de la réflexion sur l'orchestre. L'orchestre va donc doubler l'intensité sonore émise depuis l'avant scène. Ce phénomène semble avoir été bien maîtrisé par les architectes de l'antiquité comme le montre l'exemple du théâtre de Dyonisos en Grèce (voir fig. 1.3). Celui-ci possède un losange dessiné sur son orchestre qui semble représenter l'espace qui ne doit pas est recouvert afin que le son puisse s'y réfléchir¹⁰

Sur la figure 1.2b 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 1.5b). 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 de Haas 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. Ces derniers proviennent des réflexions sur les marches d'escalier de la porte royale. Il est bon de rappeler que nous utilisons une source omnidirectionnelle et qui, à la différence de la voix humaine envoie autant d'énergie vers le mur que vers les gradins. Par ailleurs, nous sommes dans l'approximation hautes fréquences où l'on néglige certains effets de diffraction. On peut donc s'attendre à avoir un signal un peu différent dans la réalité même si notre étude permet de se faire une bonne idée du comportement acoustique du bâtiment. À 160ms les quelques pics présents sont dûs aux rayons réfléchis sur les gradins qui, bien que fortement atténuerés par le matériau arrivent en phase et jouent donc un rôle non négligeable dans la réverbération (voir fig. 1.5b). Il y a ensuite deux grands pics à -10dB issus de multiples réflexions. Le premier est dû aux réflexions successives sur le *balteus*, le fond du *pulpitum* et l'orchestre. Le deuxième provient de réflexions au niveau de la porte royale et de l'orchestre. L'agencement de ces deux parties (le *balteus* et la porte royale) étant très hypothétiques, il faudra considérer la présence de ces deux pics comme peu fiable. Pour finir on distingue quatre grands pics provoqués par les réflexions sur le plafond de la scène ainsi que des combinaisons de réflexions avec la scène et les basiliques. Les deux premiers vont difficilement être distingués des pics précédent car leur écart est inférieur à 35ms mais les deux derniers seront entendus comme un écho. En ce qui concerne la position des sources-images on constate clairement que pour une mesure à -60dB il y a des sources-images tout autour du récepteur avec de fortes concentrations sur les premiers gradins, sur l'orchestre, sur la scène et sur le bas du mur (voir fig. 1.4a). C'est finalement à proximité du plan source-récepteur que se concentre la majeure partie des sources-images. Cependant on constate la présence de sources-images au niveau du plafond, de la niche centrale et des différentes *précinctions* ce qui implique que le son qui monte peut aussi redescendre vers les gradins du bas (voir fig. 1.4b). En observant les sources-images dont le niveau est supérieur à -30dB par rapport au son direct (voir fig. 1.5), on peut confirmer la provenance des pics d'énergie de la figure 1.2b décrite précédemment.

La tableau 1.2 présente les facteurs perceptifs de cette configuration initiale. Ces données confirment un temps de réverbération de l'ordre de 4s. Il est intéressant de constater que ce temps est supérieur du temps de réverbération optimal pour la parole décrit par J.Jouhaneau¹³ 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

10. [CANAC, 1967, p.118-120]

11. [CANAC, 1967, Fig. V-7 bis - p.119]

12. [CANAC, 1967, Fig. V-7 - p.118]

13. [JOUHANEAU, 1997, p.209]

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 émis¹⁴. Ce manque de compréhensibilité est corroboré par l'analyse des autres facteurs. Tout d'abord, on constate que la définition **D₅₀** et la clarté **C₈₀** augmentent avec la fréquence. Nous savons que les hommes lorsqu'ils utilisent une voix de poitrine émettent des fréquences de 80 à 400Hz environ tandis que les femmes, en voix de têtes, émettent des fréquences de 300 à 1500Hz¹⁵. Cependant, seuls les hommes étaient acteurs de théâtre à l'époque impériale. On en conclut que la compréhensibilité de leur voix n'était pas excellente mais plutôt moyenne. Elle serait plutôt adaptée à la musique puisqu'on dit que dans ce cas la clarté doit se situer entre -3dB et +3dB¹⁶. Le temps central **T_s** étant supérieur à 50ms et l'**EDT** étant supérieur à 1s, on comprend d'autant plus que le signal va s'étaler et que les syllabes seront peu distinctes. En ce qui concerne le niveau sonore, on constate que le théâtre présente un gain compris entre 3 et 6dB selon la fréquence. Cela signifie que le bâtiment a un effet bénéfique pour la transmission du son puisqu'il double le niveau sonore des plus hautes fréquences et quadruple celui des basses fréquences. On retrouve bien l'analyse faite précédemment sur l'orchestre qui double le niveau sonore de la source. Le **LF₈₀** nous indique quant à lui une sensation d'éloignement par rapport à la source ce qui n'est pas étonnant au vu des dimensions du théâtre.

C'est donc à partir de cette analyse initiale que nous allons pouvoir comparer différentes configurations du bâtiment et en déterminer l'impact sur l'acoustique.

niveau de pression acoustique ou SPL (Sound Pressure Level)

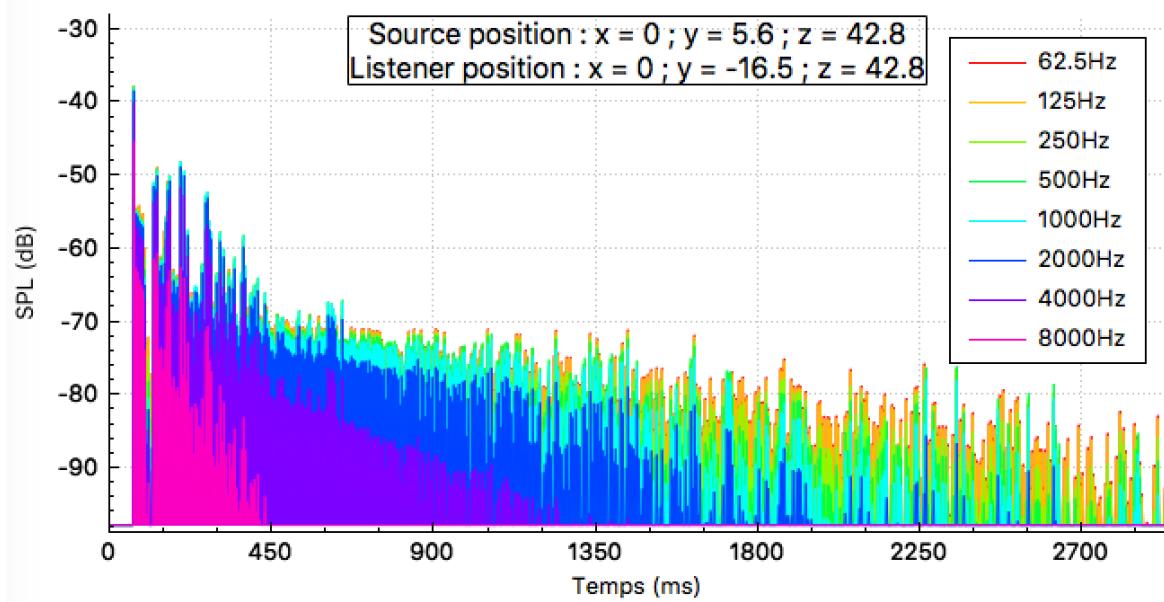
Facteur	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
EDT (ms)	2061	2039	1890	1854	1750	1452	1206	416
T₃₀ (ms)	4159	4106	3819	3591	3210	2455	1474	685
RT₆₀ (ms)	3791	3755	3554	3408	3169	2561	1549	661
SPL (dB)	-31	-31	-31	-32	-32	-33	-35	-42
G (dB)	7	7	6.7	6.5	6.2	5.8	5	3.6
C₈₀ (dB)	0.8	0.84	1.07	1.12	1.38	2.16	4.2	10.2
D₅₀ (%)	46.26	46.46	47.32	47.19	48.47	52.44	62.67	84.08
T_s (ms)	133	132	121	117	110	91	58	19
LF₈₀ (dB)	0.003	0.003	0.003	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; 42.8] et 1000000 rayons dans la configuration initiale.

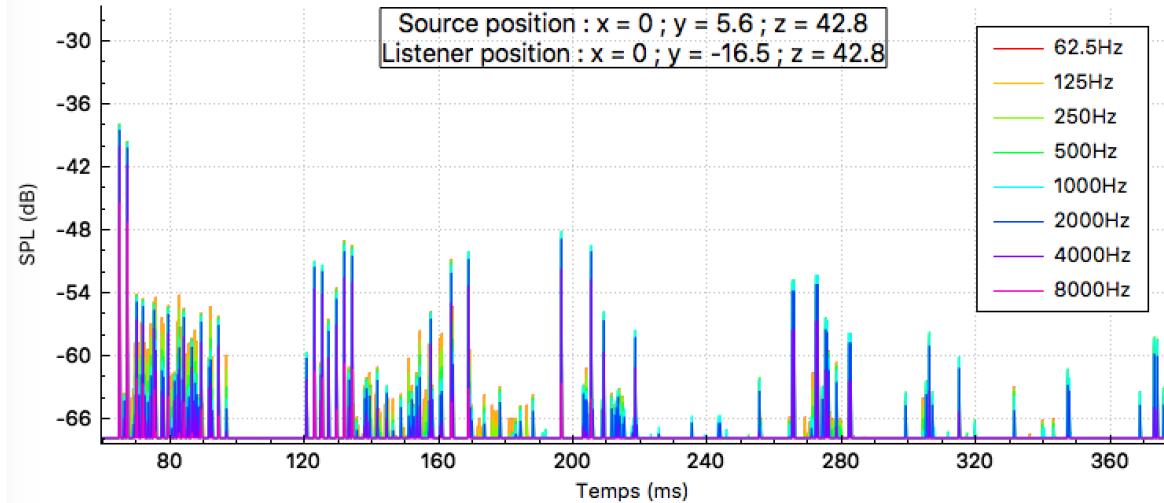
14. [JOUHANEAU, 1997, p.218]

15. [WIKIPÉDIA, Mécanismes vocaux]

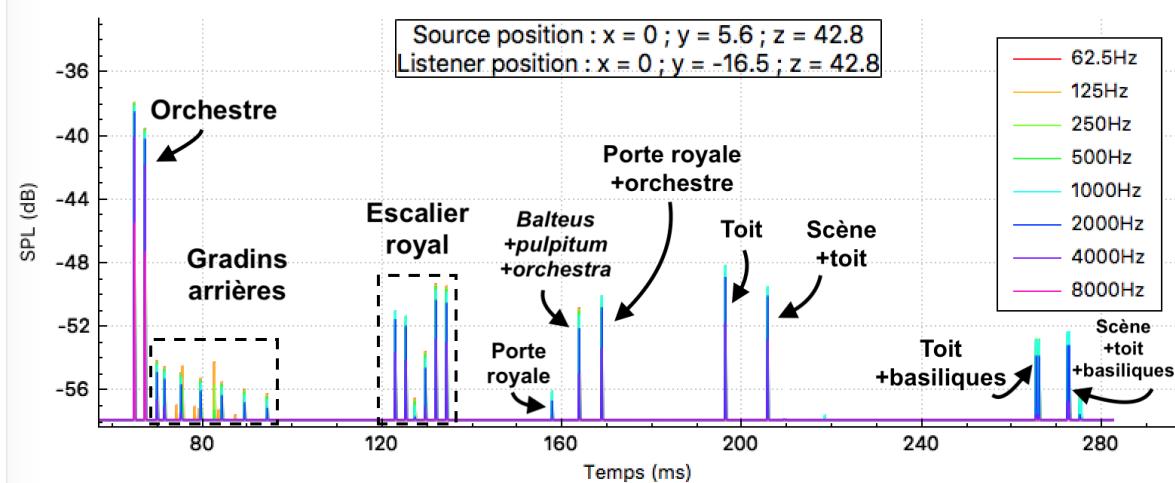
16. [KRAUSS et collab., 2009, p.59]



(a) Réponse impulsionnelle jusqu'à -60dB.

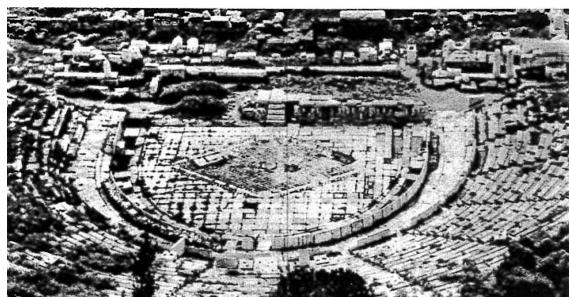


(b) Réponse impulsionnelle jusqu'à -30dB.

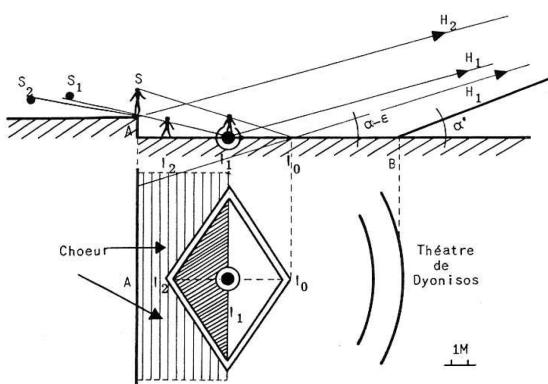


(c) Réponse impulsionnelle jusqu'à -20dB.

 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.

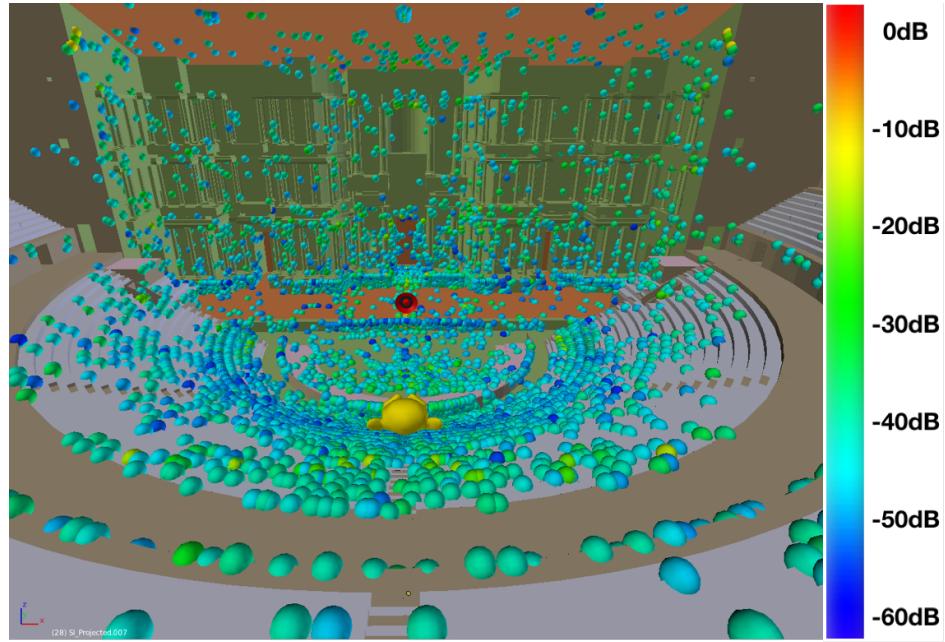


(a) Mosaïque en losange dans l'orchestre du théâtre de Dyonisos à Athènes ¹¹.

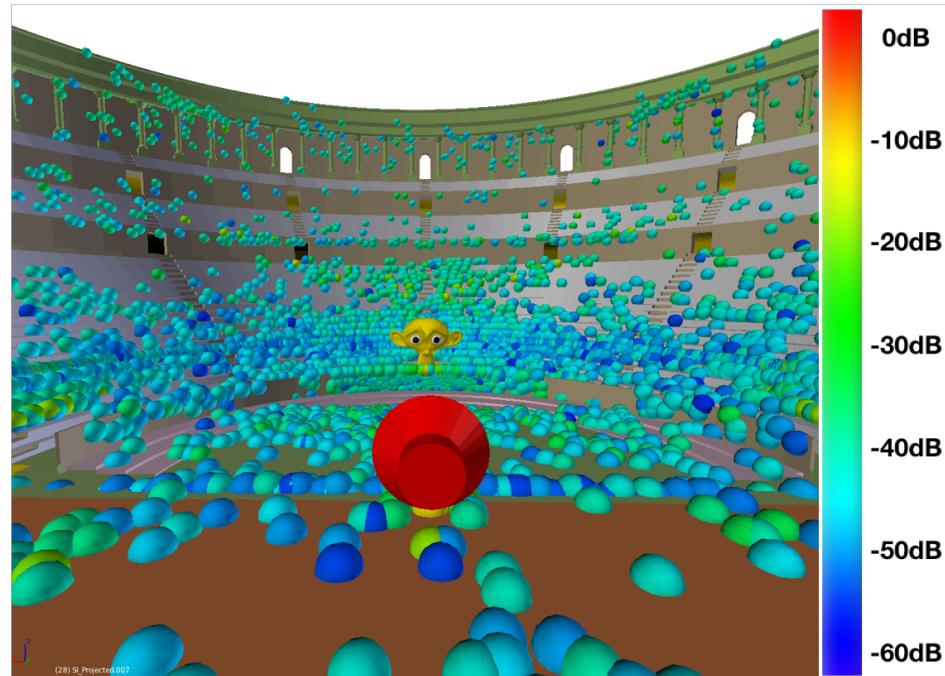


(b) Rôle supposé du losange dans l'orchestre du théâtre de Dyonisos. Emplacement du choeur ¹².

FIGURE 9.3 – Analyse de l'orchestre du théâtre de Dyonisos à Athènes.

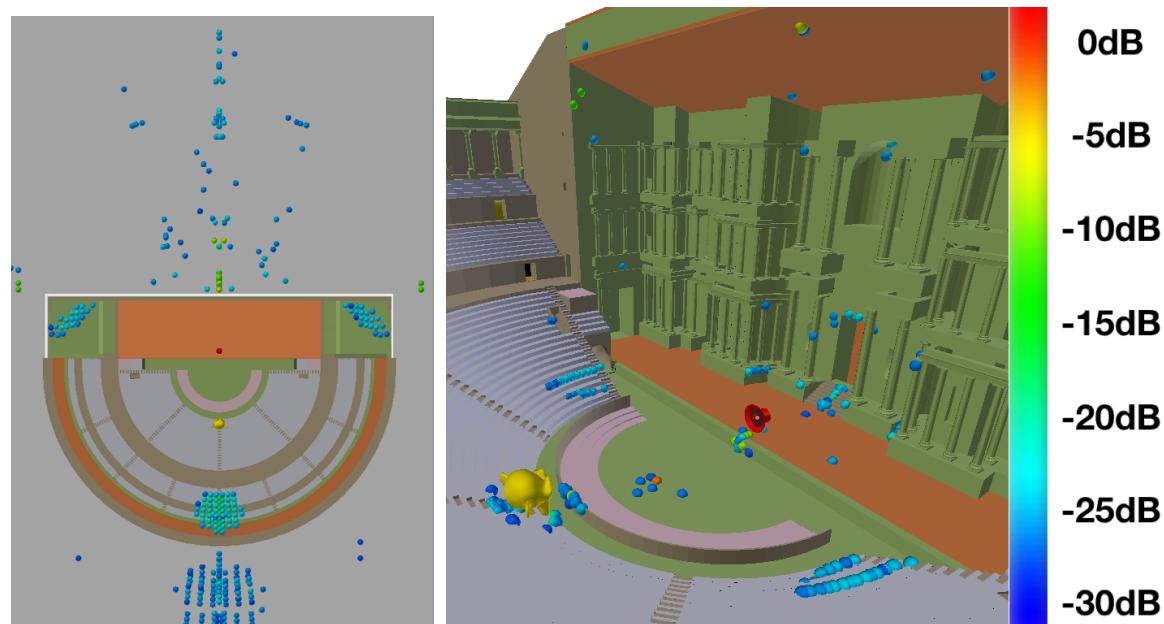


(a) Source-images projetées sur les parois du théâtre jusqu'à -60dB vu des gradins.



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

FIGURE 9.4 – 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 9.5 – Source-images dans le théâtre d'Orange dans sa configuration initiale pour 1 million de rayons jusqu'à -30dB.

Chapitre 10

Test de configurations

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

Queen

Sommaire

2.1 Décor du front de scène	16
2.2 Position des spectateurs	17
2.3 La source et le mur de scène	20
2.4 Présence de spectateurs	25
2.5 Les couvertures	25

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 étudiée 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* et le toit au dessus de la scène. Nous pouvons alors mesurer la réponse impulsionale du théâtre dans un état proche de celui d'aujourd'hui. Le tableau 2.1 présente les facteurs perceptifs de cette configuration sans décor. En les comparant au tableau 1.2 on constate que retirer le décor améliore la clarté C_{80} puisque cette configuration gagne 3 à 4dB et que le définition D_{50} passe au dessus de 60% quelle que soit la fréquence. Les facteurs EDT et T_s nous permettent de comprendre que les échos les plus forts parviennent plus rapidement à l'auditeur. Le décor a donc un effet de diffusion du son, ce qui est favorable à l'écoute musicale mais qui dégrade la transmission de la parole. Il est intéressant de constater que c'est exactement le contraire de ce qu'expliquait Formigé au début du XX^e siècle : "le *frons scaenae* renvoyait le son sans échos, après les avoir brisés grâce à la multiplicité des plans et des ornements"¹. Notons pour finir que les facteurs qui ne sont pas présentés dans tableau 2.1, tel que le LF_{80} par exemple, restent très similaires à la configuration initiale.

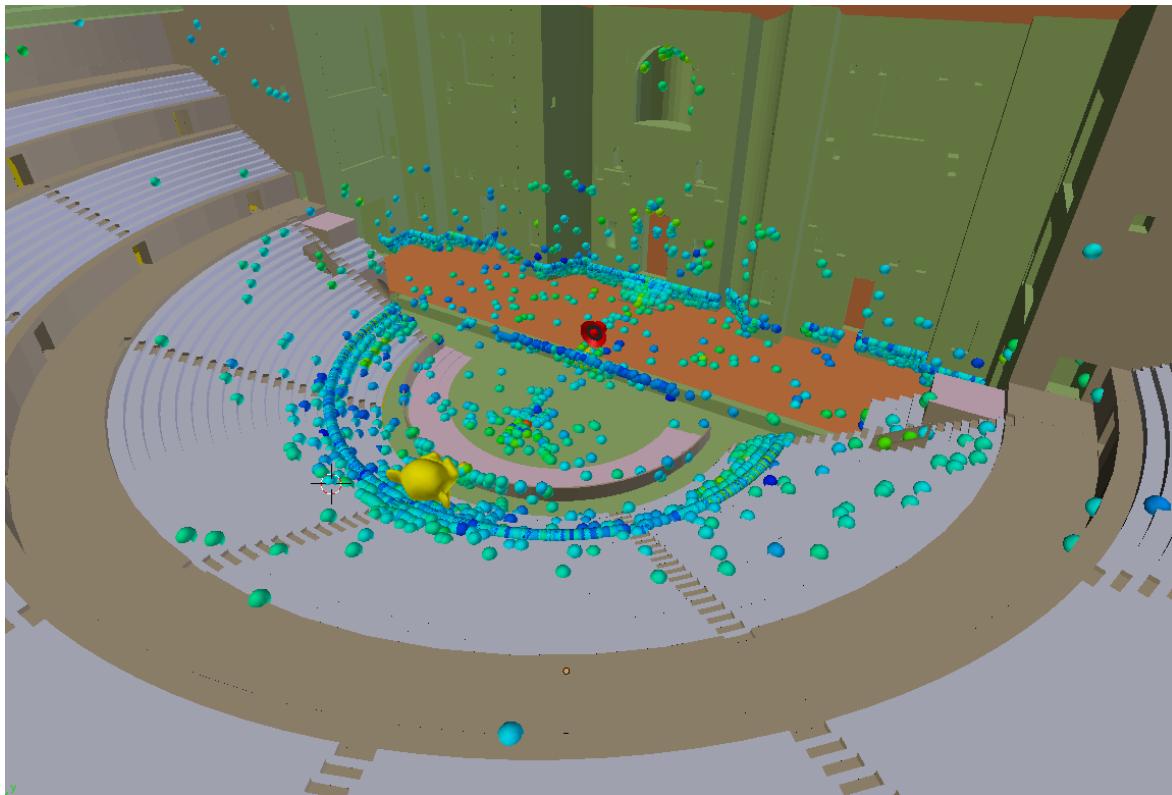


FIGURE 10.1 – Source-images projetées sur les parois du théâtre jusqu'à -60dB sans la décoration du front de scène.

1. [FORMIGÉ, 1923, p.43]

Facteur	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
EDT (ms)	1436	1387	1211	884	709	645	594	361
T₃₀ (ms)	3886	3827	3049	2745	2477	1969	1315	592
G (dB)	5.8	5.8	5.4	5	4.8	4.6	4.1	3.4
C₈₀ (dB)	4.01	4.04	4.83	5.41	5.89	6.68	8.51	13.37
D₅₀ (%)	61.01	61.17	63.81	65.42	67.04	69.84	76.22	88.34
T_s (ms)	84	83	68	60	53	44	28	12

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.

10.2 Position des spectateurs

Le test suivant consiste à comprendre l'impact de la position dans les gradins. 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 si ceux situés légèrement en recul avaient une meilleure vu d'ensemble. Ainsi nous avions les sénateurs sur des sièges mobiles dans l'orchestre, les chevaliers sur les premiers gradins puis la plèbe et pour finir les esclaves. Les tribunes étaient également occupées par des personnages importants.

Nous testons donc 12 nouvelles positions d'auditeur afin de comparer le signal perçu avec la RIR de référence (voir fig. 2.2). Nous positionnons des séries d'auditeurs sur des axes à 0°, 55° et à 90° par rapport à la perpendiculaire au mur de scène. Sur chacun 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 des récepteurs au niveau des premiers gradins et de ceux de l'orchestre. On notera que les récepteurs 1, 5, 6 et 10 sont situés à l'emplacement de personnalités importantes. Nous affichons les données sur la plage de fréquence de 500 à 1000Hz car elle semble assez centrale. Les résultats relatifs (c'est-à-dire en comparant les auditeurs les uns par rapport aux autres) sont assez similaires pour les autres fréquences. Notons que le calcul pour l'ensemble des récepteurs s'effectue en une dizaine de minutes.

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]	1668	3465	-28	1.63	53.62	107
Réf	[0; -16.5; 43.9]	1854	3591	-32	1.12	47.19	117
2	[0; -28.23; 50.02]	2572	4235	-34	0.15	37.96	154
3	[0; -37.86; 55.92]	2462	4719	-36	-0.85	32.66	156
4	[0; -44.36; 62.06]	2827	4500	-36	-1.67	30.64	176
5	[-8.74; -6.12; 41.44]	1851	3470	-27	2.6	56.79	102
6	[-13.51; -9.46; 43.86]	1892	3994	-31	2.77	56.06	108
7	[-23.12; -16.19; 50.02]	2439	4497	-33	0.64	42.03	153
8	[-31.02; -21.72; 55.92]	2693	4514	-36	0.02	43.55	170
9	[-36.34; -25.44; 62.06]	3225	4416	-37	-1.16	32.49	205
10	[-28.23; 1.66; 50.02]	3255	4466	-32	-2.56	29.46	203
11	[-37.87; 1.66; 55.92]	3840	4104	-36	-2.16	35	258
12	[-44.36; 1.66; 62.06]	4410	4664	-36	-3.32	28.64	299

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

On constate d'après le tableau 2.2 plusieurs choses. Tout d'abord, le niveau acous-

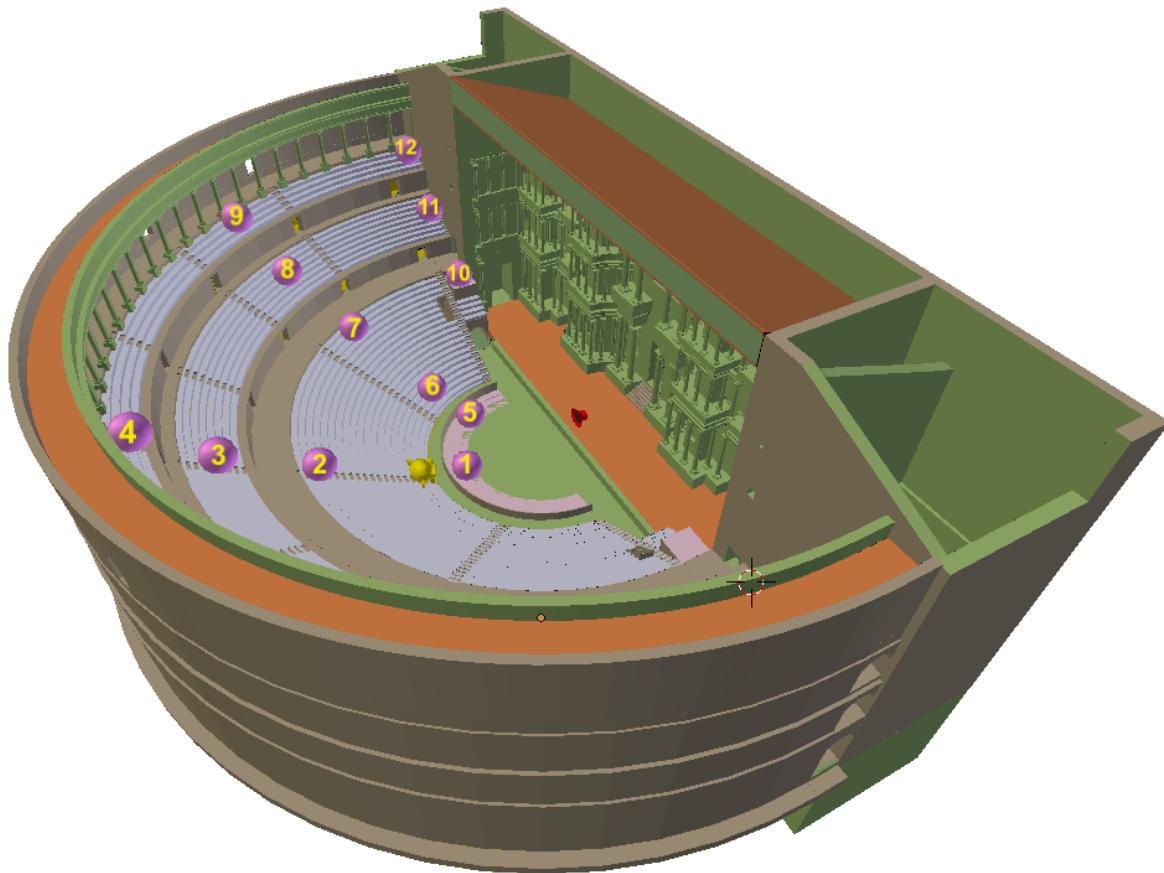


FIGURE 10.2 – Douze positions d’auditeurs (rose) à comparer à la position initiale (jaune).

tique **SPL** diminue de 4dB 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 environ 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 récepteurs situés au dessus de l’*aditus* des autres. Ainsi on constate d’après les facteurs de clarté (C_{80}) et de définition (D_{50}) que pour les récepteurs 10 à 12 la compréhensibilité est nettement dégradée. On comprend grâce à la figure 2.3 que cela est dû principalement aux deux **basiliques**. Celle située à l’est génère un fort écho éloigné du son direct de la largeur de la scène (alors que pour les récepteurs dans l’axe, l’écho généré par le mur de scène n’est séparé que par la profondeur de la scène). On a aussi une forte concentration de sources-images au niveau de la **précinction** à l’est du théâtre. La basilique occidentale va quant à elle stocker le son plus longtemps comme une sorte d’entonnoir puisque l’auditeur est dans son angle. Nous pouvons également noter que la première réflexion qui se fait sur l’orchestre lorsqu’on est dans la *cavea* se fait sur la scène lorsqu’on est au dessus des *aditi*. L’effet miroir est donc légèrement estompé. Au niveau de la tribune et donc du récepteur 10 (voir fig. 2.4) l’effet est différent puisque le son provient principalement de la partie occidentale du front de scène, le plafond et l’arrière de la tribune de qui doit être particulièrement bien adapté pour l’écoute musicale mais qui finalement est une des plus mauvaise place pour l’écoute de la parole. On analyse par ailleurs que quel que soit l’axe, lorsqu’on s’éloigne de la scène le temps de réverbération augmente globalement. Cela est dû au fait que les divers réflexions entre le mur de scène et l’arrière de l’auditeur sont plus longues lorsqu’on s’éloigne du mur. Les autres facteurs

permettent de comprendre que la compréhensibilité se dégrade aussi avec l'éloignement.

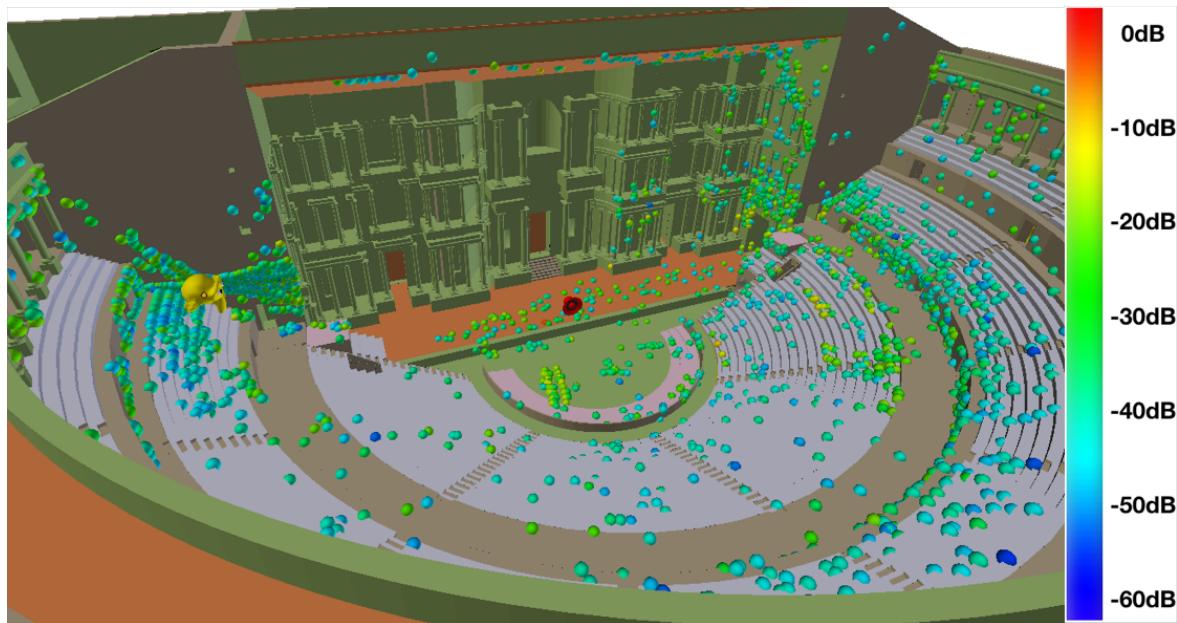


FIGURE 10.3 – Projection des sources-images pour un auditeur situé sur le deuxième *maenianum* au dessus de l'*aditus* occidental pour 1 000 000 de rayons.

Pour résumer, les spectateurs les plus éloignés entendait le son jusqu'à dix fois moins fort. Plus on se rapproche de la scène, 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.

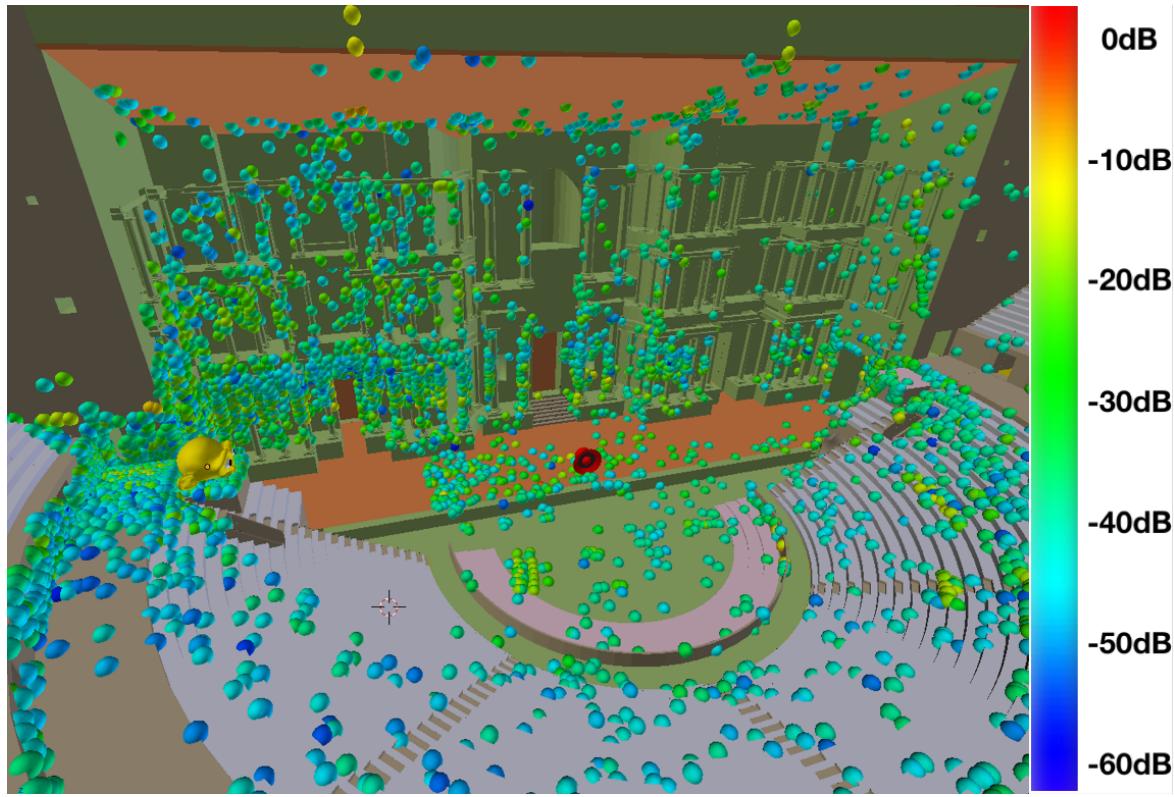


FIGURE 10.4 – Projection des sources-images pour un auditeur situé sur la tribune occidentale pour 1 000 000 de rayons.

10.3 La source et le mur de scène

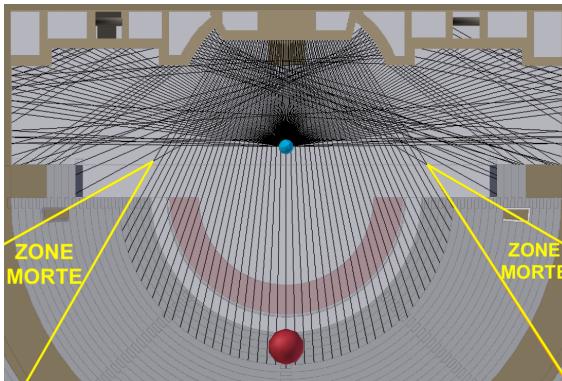
Au théâtre d'Orange il est probable que les sources sonores étaient composés d'instruments tels que les orgues hydrauliques² et les *aulos*³ ou bien de la voix des acteurs⁴. ainsi leur directionnalité serait plutôt orientée vers le public et non vers le mur de scène. La fonction du mur semble donc dans un premier temps 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 à la position de la source sonore. La figure 2.5a 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) dans la configuration de référence sans décor. On constate que le mur autour de la porte centrale renvoi des rayons sur une partie des gradins. Les rayons aux extrémités de cette partie rectiligne reviennent avec un angle de 30° environ. D'autre part, l'*exèdre* curviligne ainsi que les baldaquins en saillie renvoient les rayons vers les tribunes. On constate donc que dans cette configuration, la réflexion sur le mur ne permet pas de couvrir l'ensemble des gradins. La diffusion apportée par la décoration sera donc essentielle pour diffuser le son à l'ensemble des spectateurs. Les trois autres figures montrent que les réflexions sur le mur couvre l'ensemble des gradins et que certaines zones sont soumises à un effet de focalisation. La figure 2.5b représente les réflexions sur le mur pour une source située sur

2. [ROCCONI, 2008, p.65]

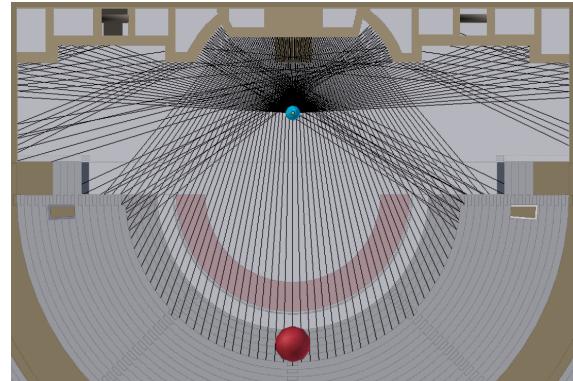
3. [ROCCONI, 2008, p.33]

4. [BARKER, 2008]

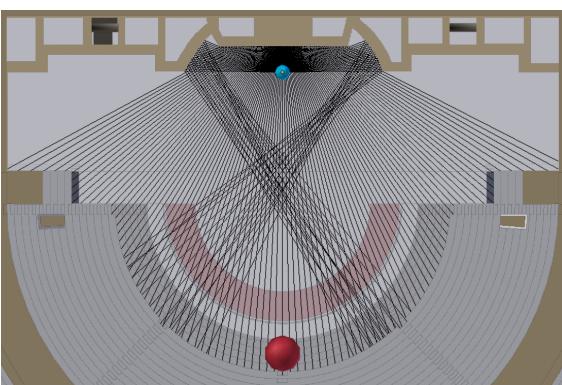
l'axe entre les portes latérales menant aux *parascaenia* c'est-à-dire à Y=9m. On constate dans ce cas que l'*exèdre* curviligne permet de concentrer une partie des rayons sur les extrémités de la *cavea*. De la même manière, grâce aux figures 2.5c et 2.5d, on constate bien que plus on s'éloigne du bord de la scène, plus l'*exèdre* concentre les rayons vers l'axe central de la *cavea*. On voit d'ailleurs sur la figure 2.5d 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*.



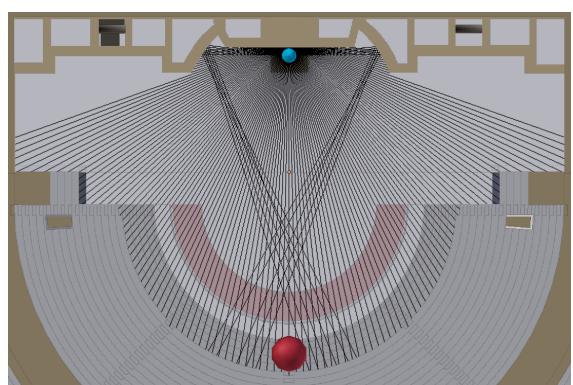
(a) Reflexion des rayons sur le mur de scène pour une source située en [0; 3,6; 42,8].



(b) Reflexion des rayons sur le mur de scène pour une source située en [0; 9; 42,8].



(c) Reflexion des rayons sur le mur de scène pour une source située en [0; 14,5; 42,8].



(d) Reflexion des rayons sur le mur de scène pour une source située en [0; 16,5; 42,8].

FIGURE 10.5 – Reflexion des rayons propagés depuis une source vers le mur de scène dans un plan horizontal.

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 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 2.6). D'après le théorème de Thalès 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 réflexions se feront sur 1,33m de moins sur l'orchestre. On note par ailleurs que 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 toucherons l'orchestre qu'à 14,63m du bord de la scène ce qui tombe en plein dans les gradins mobiles. Un acteur se trouvant en fond de scène ne bénéficiera donc pas de la réflexion sur l'orchestre pour amplifier le son.

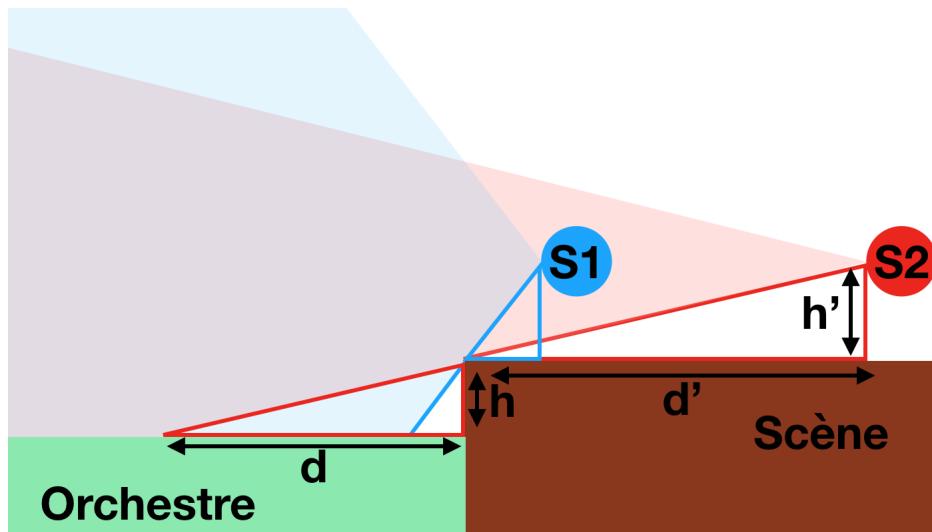


FIGURE 10.6 – Vu de profil de la propagation sonore à partir de deux sources S1 et S2. Proportion de signal réfléchi sur l'orchestre plus faible pour S2 que pour S1.

Nous plaçons maintenant la source au niveau de la porte latérale occidentale du mur de scène centrée dans la profondeur au niveau de l'axe entre les portes des deux *basi-liquies*. On constate sur la figure 2.7 qu'il y a quelques échos suffisamment espacées pour être discernés. Tout de suite après le son direct la réflexion ne provient pas de l'orchestre mais des degrés bas munies de sièges mobile. Celui-ci est donc fortement atténué et l'effet miroir de l'orchestre est perdu. Il pourra exister pour les spectateurs situés dans la partie orientale de la *cavea* puisque l'angle le permettra. Le grand pic situé à 30ms environ après le son direct est lié aux réflexions sur les parties basses du mur de scène. Les pics d'énergie plus tardif sont liés aux réflexions sur le toit. Le tableau 2.3 représente le temps de réverbération et les indices de compréhensibilité pour différentes positions de spectateurs (voir fig. 2.8). Les indices 6', 9', etc sont les récepteurs symétriques aux 6, 9, etc par rapport à l'axe central. Notons déjà qu'avec une source à cette position le gain est de 9dB environ donc 2dB de plus que dans la position initiale. Nous constatons alors que les spectateurs sur l'aile orientale ont une compréhensibilité médiocre tandis que ceux sur la tribune occidentale (récepteur 10) en ont une correcte. Le récepteur 12 ne peut pas être pris en compte en l'état car le son direct n'est pas perçu, les valeurs de clarté et définition sont donc faussées.

Nous avons vu précédemment que la niche centrale renvoi une partie du son émis par une source depuis la scène. Qu'en est-il d'une source qui serait située dans la niche même. En étudiant le *postscenium* et notamment les différents passages permettant de circuler à l'intérieur du mur de scène nous constatons que l'accès à cette grande niche centrale est praticable et qu'il existe des ouvertures pour y faire entrer des personnes. La figure 2.9 montre la trajectoire des rayons lorsque la source est située dans la niche. On

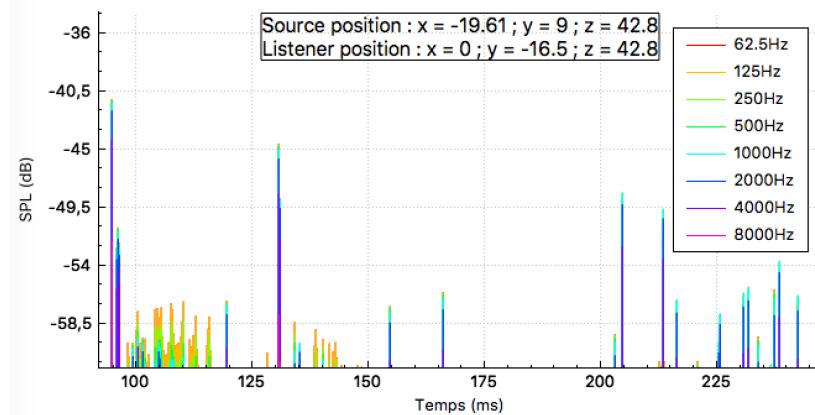


FIGURE 10.7 – Réponse impulsionnelle jusqu'à -20dB pour une source latérale située en [-19.61 ; 9 ; 42.8] et un récepteur en position initiale [0 ; -16.5 ; 42.8] pour 1000000 de rayons.

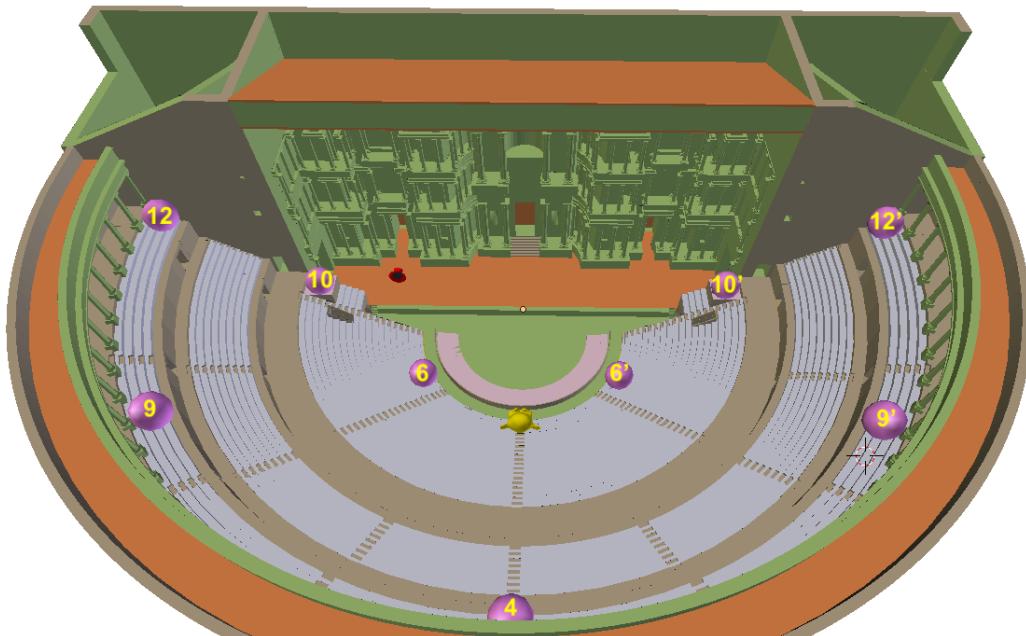


FIGURE 10.8 – Répartition des récepteurs pour le test de source latérale.

constate que l'intégralité des gradins est couvert et qu'une partie du son se réfléchit sur le toit au dessus de scène pour mieux repartir vers la *cavea*. Par ailleurs le tableau 2.4 montre que le gain est 6dB supérieur à la configuration de référence, l'énergie est donc quatre fois plus grande. On voit également que la compréhensibilité sera excellente car la définition est au delà de 70%. Cette emplacement semble donc parfaitement convenir à l'émission de son, grâce au fait que celui-ci est amplifié par l'arrière de la niche qui présente une surface très réfléchissante. Cette niche voutée fonctionne donc exactement comme un porte-voix. On pourrait alors imaginer l'apparition de personnages divins⁵ avec une voix d'une puissance surdimensionnée et d'une grande clarté.

5. [MAUFRAS, 1847, p.12]

Récepteur	[x; y; z] (m)	T₃₀ (ms)	C₈₀ (dB)	D₅₀ (%)
Réf	[0; -16.5; 42.8]	3710	0.77	51.22
4	[0; -44.36; 62.06]	4655	1.2	48.27
6	[-13.51; -9.46; 43.86]	3685	1.58	54.82
9	[-36.34; -25.44; 62.06]	4681	0.9	43.82
10	[-28.23; 1.66; 50.02]	4548	3.22	55.73
12	[-44.36; 1.66; 62.06]	5518	-14.23	2.96
6'	[13.51; -9.46; 43.86]	3597	-0.01	40.71
9'	[36.34; -25.44; 62.06]	4635	-1	34.69
10'	28.23; 1.66; 50.02]	4612	-2.18	22.98
12'	[44.36; 1.66; 62.06]	5362	-6.49	17.11

TABLEAU 10.3 – Facteurs perceptifs pour différents récepteurs sur la bande de fréquence de 500Hz pour 1 000 000 de rayons et une source en [-19.61; 9; 42.8].

Facteur	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
EDT (ms)	1890	1857	1553	1147	755	714	368	171
T₃₀ (ms)	4082	3985	3662	3173	2720	2272	1499	628
SPL (dB)	-29	-29	-30	-31	-31	-32	-36	-46
G (dB)	13.7	13.7	13	12.5	12.2	11.9	11.4	10.6
C₈₀ (dB)	6.03	6.08	6.55	6.9	7.31	8.24	10.63	16.2
D₅₀ (%)	71.96	72.14	74.9	77.13	78.95	81.88	87.48	94.6
T_s (ms)	88	87	74	64	57	44	27	14
LF₈₀ (dB)	0.039	0.039	0.038	0.037	0.037	0.037	0.036	0.036

TABLEAU 10.4 – Facteurs perceptifs pour une source en [0; 18.93; 60.89], un auditeur en [0; -16.5; 42.8] et 1000000 rayons.

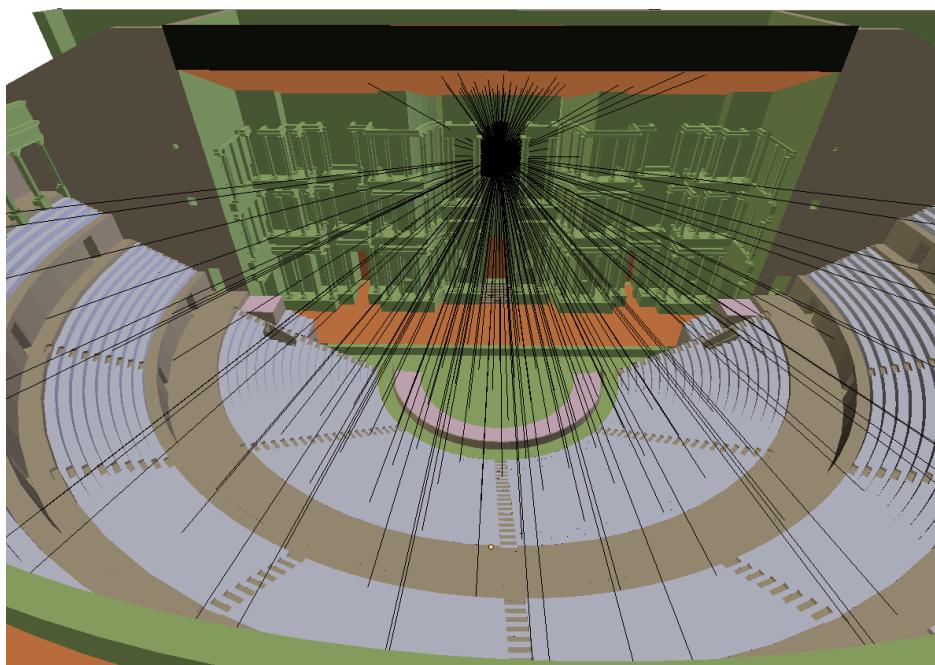


FIGURE 10.9 – Propagation de 1000 rayons depuis la niche centrale.

10.4 Présence de spectateurs

La présence d'un public modifie le temps de réverbération des salles, ainsi selon qu'elle soit pleine ou vide, la salle ne "sonnera" pas de la même manière⁶. Ainsi, nous comparons les facteurs perceptifs préalablement établis dans la configuration initiale pour un théâtre plein (voir tab.1.2), un théâtre vide et un théâtre rempli aléatoirement à 70%. La source et le récepteur sont positionnés dans la configuration initiale (voir section 1.1). Lorsque le théâtre est complètement vide, c'est-à-dire que le matériau de tous les gradins n'est plus de type "Audience" mais de type "Calcaire" (voir section 1.1), on observe logiquement que le temps de réverbération augmente considérablement (voir tab.2.5). Effectivement le public absorbe les ondes sonores tandis que le calcaire les réfléchit fortement. Le test est donc effectué pour deux millions de rayons afin de pouvoir mesurer la réverbération sur un temps plus long. Ces multiples réflexions impliquent une augmentation du gain et une dégradation de la compréhensibilité.

Dans un second temps on affecte un matériaux de type "Audience" à 70% les faces des gradins de manière aléatoire. On obtient alors les résultats présentés dans la tableau 2.6. Nous constatons que les facteurs perceptifs évolue de manière proportionnelle au pourcentage de spectateurs dans le théâtre. Ainsi, plus il y aura de spectateurs meilleure sera la clarté.

Facteur	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
EDT (ms)	5813	5666	5388	5293	4518	2993	1436	594
T₃₀ (ms)	7809	7672	7144	7061	6630	4643	2178	810
G (dB)	10	10	10	10.1	9.8	8.9	7.3	5.2
C₈₀ (dB)	-2.92	-2.85	-2.87	-3.06	-2.65	-1.36	1.38	7.34
D₅₀ (%)	28.7	29.01	28.85	27.9	29.76	35.97	50.5	78.09
T_s (ms)	344	336	322	321	278	187	93	29

TABLEAU 10.5 – Facteurs perceptifs pour une source en [0; 5.6; 42.8] et un auditeur en [0; -16.5; 42.8] et 1000000 rayons dans le cas d'un théâtre vide.

Facteur	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
EDT (ms)	2726	2681	2375	2209	2030	1688	1244	521
T₃₀ (ms)	5647	5565	5206	4794	4193	3032	1657	696
G (dB)	8	8	7.7	7.7	7.4	7	6	4.4
C₈₀ (dB)	-0.17	-0.13	0.1	0.14	0.44	1.29	3.42	9.16
D₅₀ (%)	41.67	41.89	42.84	42.82	44.33	48.76	59.79	82.39
T_s (ms)	171	168	154	147	134	107	65	22

TABLEAU 10.6 – Facteurs perceptifs pour une source en [0; 5.6; 42.8] et un auditeur en [0; -16.5; 42.8] et 2000000 rayons dans le cas d'un théâtre rempli à 70%.

10.5 Les couvertures

Voyons dans un premier temps l'impact de la couverture de la scène. Ce plafond incliné de 19° est orienté vers le public et recouvre entièrement la scène. Il était a priori

6. [JOUHANEAU, 1997, p.212]

composés de caisson qui auraient apporté un effet de diffusion (voir fig. 2.10). Cependant, n'ayant aucune donnée pour confirmer cette hypothèse, nous nous contentons d'utiliser un plafond lisse pour ne tester que sa pure réflexivité. La figure 2.11 montre que sur l'axe centrale les réflexions successives sur le mur et sur le plafond permettent de couvrir l'ensemble des gradins. Nous affichons la différence entre deux réponses impulsionales,

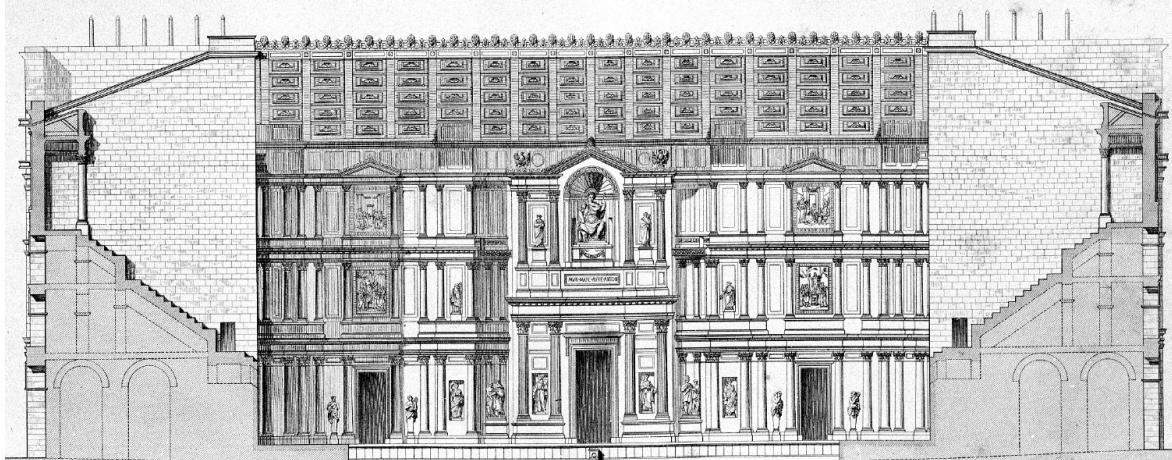


FIGURE 10.10 – Restitution du bâtiment de scène par A. Caristie représentant le plafond à caissons⁷.

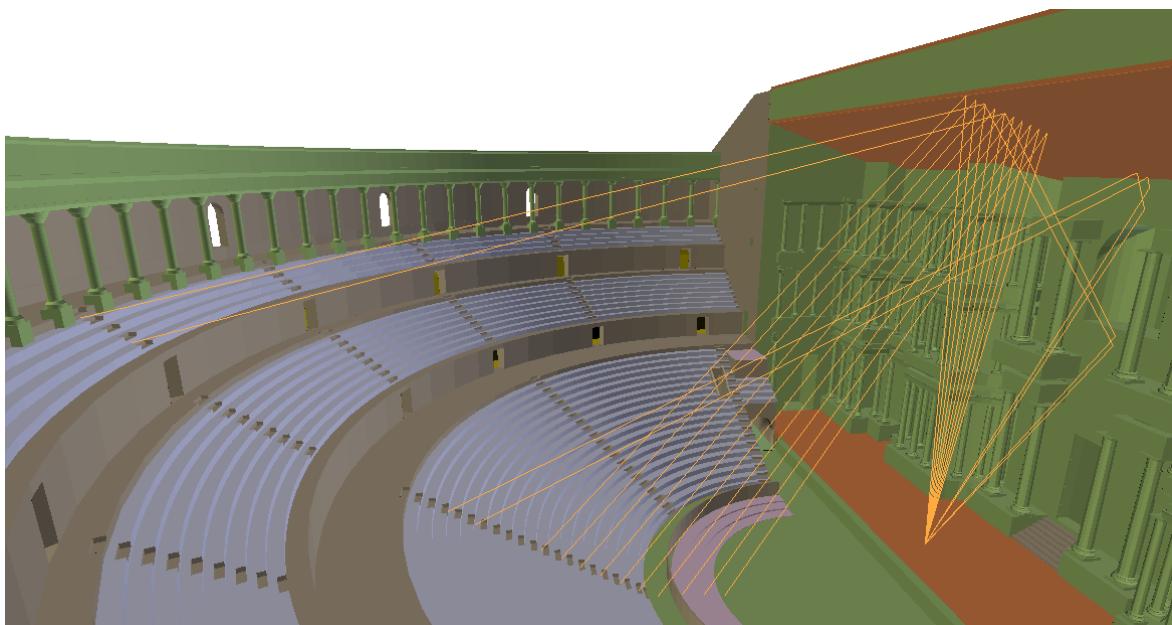


FIGURE 10.11 – Angle des rayons se propageant depuis l'avant scène et se réfléchissant successivement sur le mur de scène et sur le toit.

avec et sans toit (voir fig 2.12). Nous constatons que le toit n'a d'impact que sur les premières réflexions et qu'il va générer principalement deux échos.

Le tableau 2.7 permet de comparer les facteurs perceptifs avec la configuration initiale. On constate que retirer le toit diminue le temps de réverbération et améliore la compréhensibilité. Cela se comprend aisément par la présence d'échos comme nous l'avons vu dans la section 1.2. On constate grâce au tableau A.1 que cela est vrai quelle que soit la

7. [BADIE et collab., 2013a, Pl. III]

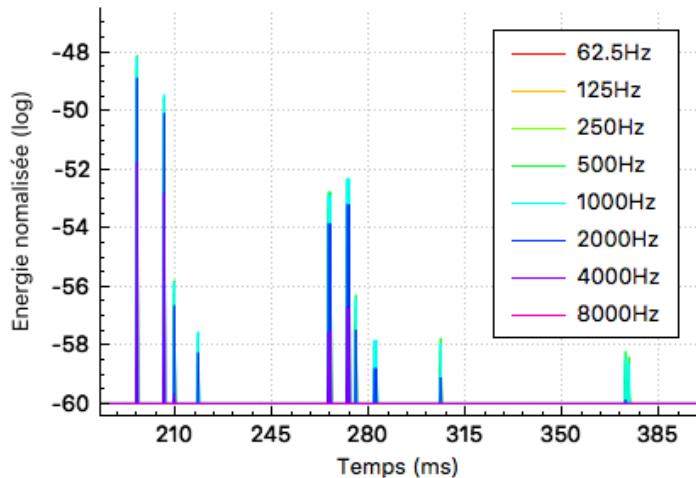


FIGURE 10.12 – Différence entre les réponses impulsionnelles avec et sans toit pour une source et un récepteur positionnés dans la configuration initiale pour 1 000 000 de rayons.

Facteur	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
EDT (ms)	1867	1854	1636	1501	1323	1130	623	387
T₃₀ (ms)	3417	3416	3211	2966	2700	2218	1383	672
G (dB)	6.4	6.4	5.9	5.5	5.3	5	4.4	3.5
C₈₀ (dB)	2.4	2.43	3.14	3.65	4.1	4.99	7.01	12.22
D₅₀ (%)	53.78	53.96	56.75	58.48	60.3	64.04	72.12	86.9
T_s (ms)	106	105	89	81	73	59	37	14

TABLEAU 10.7 – Facteurs perceptifs pour une source en [0; 5.6; 42.8] et un auditeur en [0; -16.5; 42.8] et 1000000 rayons sans plafond au dessus de la scène.

position du spectateur (voir section 2.2). Par ailleurs le gain (donc le niveau sonore global) augmente de près d'1dB grâce à la présence du toit.

On peut supposer que la *porticus in summa cavea* avait un rôle similaire aux balcons des théâtres modernes, c'est à dire de rabattre le son sur les spectateurs. Les connaisseurs savent donc que les meilleures places en terme d'acoustique ne sont pas forcément les plus chères mais souvent celles situées sous les balcons car le son s'y réfléchi. Si cette astuce peut fonctionner pour la musique elle produira l'effet inverse pour la parole puisque le temps de réverbération se trouve augmenté. Ainsi les spectateurs situés au niveau du troisième *maenianum* seront privilégiés pour l'écoute musicale et lésés pour le texte. Même si les buts premiers de la *porticus in summa cavea* eu devaient plutôt être pratique et esthétique, Vitruve explique que la position doit également être conçue pour l'acoustique : "la voix, en s'étendant, parviendra jusqu'à l'extrémité des degrés et jusqu'au haut de ce plafond" ⁸. La figure 2.13 confirme que les spectateurs situés au sommet de la *cavea* bénéficient principalement des réflexions sur la *porticus in summa cavea*.

Le *velum* était a priori composé de toiles de lin ⁹ suspendues au dessus de la *cavea*. Ce type de matériau est très difficile à trouver dans les bases de données modernes car ce type d'agencement est rare. Par ailleurs les tests sur tissus fait en laboratoire sont souvent effectués devant une surface dure. Or dans notre cas il n'y a aucune surface dure derrière les *vela*. Comment connaître les coefficients d'absorption adéquates ? Nous sa-

8. [MAUFRAS, 1847, p.11]

9. [FORMIGÉ, 1923, p.38]

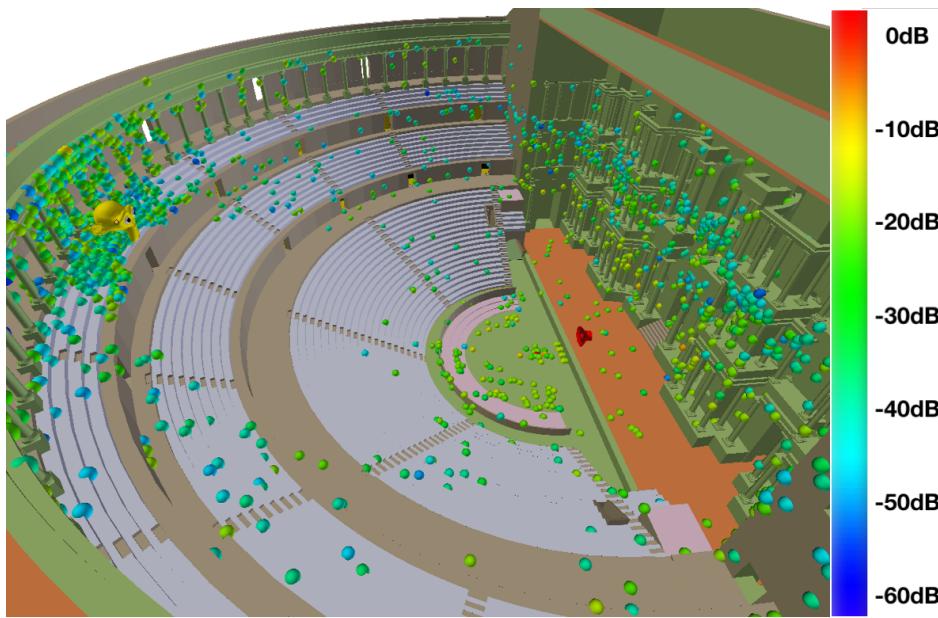


FIGURE 10.13 – Projection des sources-images pour un auditeur situé sur le troisième *maenianum* au niveau de l'axe central pour 1 000 000 de rayons.

vons que l'absorption d'un matériau est liée à sa porosité et sa fibrosité. Effectivement, si l'onde sonore peut pénétrer à l'intérieur du matériau, elle y engendre des frottements et des déplacements de fibres légères, d'où transformation d'énergie. Ainsi, le tissu, absorbe beaucoup les hautes fréquences et transmet les basses fréquences.¹⁰. N'ayant pas plus d'information à ce sujet, nous considérons donc que très peu de son sera réfléchi sur le *velum*. Ainsi les résultats établis avec et sans *velum* seront très similaires. On peut néanmoins noter deux choses. Un *velum* déployé peut permettre d'isoler des bruits extérieurs (hautes fréquences) qu'il pourrait y avoir au dessus du théâtre. Ils sont a priori très peu nombreux car il s'agirait du bruit des oiseaux ou du vent dans les arbres. Par contre, les voiles pourraient elles-mêmes être génératrice de bruit lorsque le vent s'y engouffre.

10. [ACOUPHILE.FR, Matériaux]

Conclusion

Nous avons vu dans cette partie que la maquette virtuelle du théâtre d'Orange ainsi que l'outil de calcul acoustique développés durant ce projet permettent d'obtenir un certain nombre de résultats d'analyse. Comme nous l'avons vu, l'acoustique de ce bâtiment a été maintes fois discutée et étudiée mais, à notre connaissance, aucune étude ne s'est portée sur le théâtre à ce niveau de restitution. Nous avons ainsi pu constater que le théâtre, de part son encloisonnement et ses matériaux très réfléchissants, amplifie le son émis depuis la scène. L'absence de plafond au dessus des spectateurs permet d'obtenir un bon niveau de compréhensibilité sans toute fois qu'il soit excellent. On comprend que la diction et la puissance vocale des acteurs sera primordiale pour être compris en tout point des gradins. La diction car la réverbération rend les syllabes difficiles à différencier notamment lorsqu'on s'éloigne de la scène et de l'axe central de la *cavea*. La puissance sonore car les dimensions gigantesques du lieu entraînent irrémédiablement une diminution du niveau sonore en s'éloignant de la scène. Les spectateurs du dernier *maenianum* bénéficieront néanmoins des réflexions sur le plafond de la *porticus in summa cavea*. Nous avons vu par ailleurs que le *velum* aurait peu d'effet sur l'acoustique et que le toit au dessus de la scène permet de renvoyer les ondes sonores sur l'ensemble du public. Cependant, ce dernier crée également des échos, ce qui dégrade la clarté vocale. Le décor du front de scène, quant à lui, diffuse une partie du son qui s'y réfléchi, ce qui dégrade également la clarté. A contrario, un son plus diffus et plus réverbéré sera plus agréable pour une écoute musicale. On imagine donc que la musique avait une place importante dans les spectacles tandis que la transmission de la parole était compensée par une excellente diction de la part des acteurs. Par ailleurs, nous avons vu qu'une source sonore placée dans la niche voutée centrale pouvait projeter le son à tous les spectateurs avec une puissance augmentée. Cela nous laisse imaginer la présence de personnage ou de bruitages spectaculaire à cet endroit. Nous avons également montré que plus il y aura de spectateur plus la voix de l'acteur sera claire. Le bâtiment perdra par contre une partie de l'amplification liée à son architecture.

Ces analyses permettent de comparer le théâtre d'Orange avec d'autres monuments similaires. Cela a déjà été entrepris par F. Canac par exemple lors de mesures *in situ* (voir fig. 2.14). Notons que sur ce graphique l'échelle des abscisses de Orange et Aspendos a été décalée par rapport à celle d'Epidaure pour faciliter la lecture. Cette étude¹¹ révèle que dans leur état moderne les théâtres d'Aspendos (Turquie), d'Orange et d'Epidaure (Grèce) peuvent se classer dans cet ordre si l'on compare leur gain (c'est-à-dire l'intensité sonore à égale distance pour une source de niveau identique). Cela est directement lié au pourcentage d'ouverture du théâtre. Ainsi Aspendos étant le théâtre le plus cloisonné des trois, c'est celui qui aura le plus fort gain. Par ailleurs on constate que dans les trois cas l'onde parcourt l'ensemble des gradins sans obstacle puisque la décroissance n'est du qu'à la distance et les trois courbes sont parallèles. Le problème de ce genre d'analyse

11. [CANAC, 1967, 137-162]

12. [CANAC, 1967, p.162]

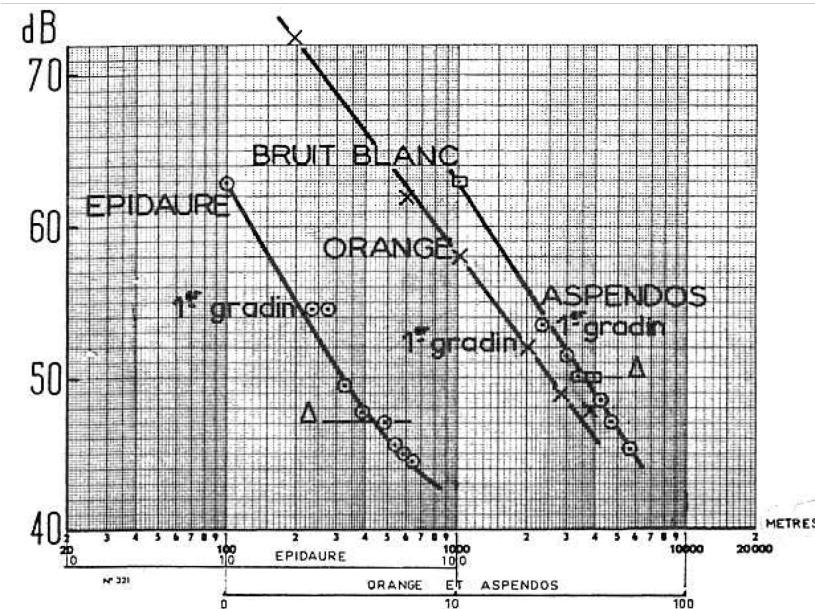


FIGURE 10.14 – Comparaison de l'intensité perçue entre les théâtre d'Epidaur, Aspendos et Orange ¹².

est qu'on ne tient pas compte de l'apparence initiale des théâtres. Seules des maquettes le permettent et en l'occurrence les maquettes virtuelles. Le projet ERATO ¹³ vise à comparer virtuellement les théâtres d'Aspendos, de Jerash (Jordanie), de Syracuse (Sicile) ainsi que les *odéons* d'Aosta (Italie) et d'Aphrodisia (Turquie) (voir fig. 2.15). Ces études confirment que, comme pour le théâtre d'Orange, la gain d'un théâtre vide est plus important et la clarté est plus faible qu'avec un théâtre plein. Le tableau ?? compare quelques uns des ces résultats avec ceux présentés dans ce document pour le théâtre d'Orange.



FIGURE 10.15 – Photos des monuments sélectionnés et leur modèle virtuel restitué par le projet ERATO ¹⁴. De gauche à droite : Jerash, Aspendos, Syracuse, Aosta, Aphrodisia.

Dans le futur il sera alors extrêmement intéressant de mener des tests similaires avec des sources directionnelles. Nous prévoyons par ailleurs avant la fin du projet d'enregistrer les instruments de musique antiques ainsi que des textes anciens en chambre sourde. Cela permettra d'écouter des sons très proches de ceux qui étaient émis sur la scène du théâtre d'Orange lors de sa période d'activité avec la réverbération réelle du lieu. Par ailleurs l'œuvre de Vitruve sur l'acoustique des théâtres antiques ??[Livre V]vitruve laisse à penser que les architectes de l'époque avaient pensé à des configurations ayant des effets plus subtils. Vitruve traite pendant un chapitre entier des l'utilisation des harmonies pour améliorer le son des théâtres : " de même que les anciens faisaient leurs instruments avec des lames de cuivre ou de corne, en forme de vases, pour rendre les cordes plus so-

13. [RINDEL, 2013, oeuvre intégrale]

14. [RINDEL, 2013, fig.1]

nores; de même, pour les théâtres, ils ont établi, par le moyen de la science harmonique, certaines proportions pour grossir la voix" ¹⁵. Il consacre une deuxième chapitre aux vases d'airain qui selon lui doivent être répartis dans la théâtre pour résonner à " à la quarte, à la quinte et aux autres consonances, jusqu'à la double octave" ¹⁶. Voici de beaux sujets de recherche qui pourraient venir compléter notre étude. Notons néanmoins que le logiciel que nous avons développé ne permet pas de mener ce type d'étude.

15. [MAUFRAS, 1847, p.7]

16. [MAUFRAS, 1847, p.8]

Références

ACOUPHILE.FR.

ARNAUD, A. 1808, *Oeuvres complètes*, vol. Tome III, L'imprimerie de Valade.

BADIE, A., M. FINCKER, J.-C. MORETTI, L. RABATEL, E. ROSSO et D. TARDY. 2013a, «Le théâtre d'orange - rapport final d'opération - planches», PACA Vaucluse, Orange Théâtre antique 84 087 0031 - Patriarche 9827 n2012-203.

BADIE, A., M. FINCKER, J.-C. MORETTI, L. RABATEL, E. ROSSO et D. TARDY. 2013b, «Le théâtre d'orange - rapport final d'opération - texte», cahier de recherche. PACA Vaucluse, Orange Théâtre antique 84 087 0031 - Patriarche 9827 n2012-203.

BARKER, A. 2008, «The care and training of the voice in the roman empire», *The International Society for the Study of Greek and Roman Music and its Cultural Heritage*.

BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE, J. 1838, *Livre de la Poétique d'Aristote*, Ladrange.

CANAC, F. 1967, *L'acoustique des théâtres antiques. Ses enseignements*, Éditions du centre national de la recherche scientifique, 15, quai Anatole-France - Paris VII.

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.

HAAS, H. 1951, *Influence de l'écho sur la compréhension de la parole*, vol. 1, Acoustica.

JOUHANEAU, J. 1997, *Acoustique des salles et sonorisation, Acoustique appliquée*, vol. 3, Conservatoire national des arts et métiers.

KRAUSS, G., R. YEZOU et F. KUZNIK. 2009, «Acoustique du bâtiment», Cours-Institut national des sciences appliquées de Lyon.

MAUFRAS, M. C.-L. 1847, *Vitruve : De l'architecture*, vol. V, Panckoucke.

ODEON. «Odeon webpage», URL <https://odeon.dk/>.

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.

ROCCONI, E. 2008, «Music in the roman empire - theoretical evidence and archaeological findings», *The International Society for the Study of Greek and Roman Music and its Cultural Heritage*.

VASSILANTONOPoulos, S. L. et J. N. MOURJOPoulos. 2009, «The acoustics of roofed ancient odeia : The case of herodes atticus odeion», *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 95, p. 291–299.

WIKIPÉDIA. «Voix humaine», URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Voix_humaine.

Annexe B

Liste des acronymes

AABB *Axis-Aligned Bounding Box.* 95

BEM *Boundary Element Method.* 65

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. 111, 117, 130, 135, 136, 142–144, 150, 152, XII

CAO *Conception Assistée par Ordinateur.* 21, 22, 112

CIREVE *Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle.* 21

CMAP *Centre de Mathématiques Appliquées de l'école Polytechnique.* 1, 72

CNRS *Centre National de Recherche Scientifique.* 1, 6

D₅₀ Exprime le degré de séparation acoustique d'un son par rapport à un autre. 111, 117, 135, 136, 142–144, 150, 152, XII

EDT **RT₆₀** exprimé à partir de l'extrapolation de l'énergie entre -0 et -10dB, ou *Early Decay Time.* 111, 116, 117, 136, 142, 143, 150, 152, XII

FDTD Méthode des différences finies (*Finite Difference Time Domain*). 65

FEM *Finite Element Method.* 65

FFT Transformation de Fourier rapide, ou *Fast Fourier Transform.* 87

FIR Filtre à réponse impulsionale finie, ou *Finite Impulse Response filter.* 87

G Gain acoustique. 118, 136, 143, 150, 152

IHM *Interface Homme-Machine.* 113, XI

IRAA *Institut de Recherche sur l'Architecture Antique.* 6, 8, 15, 16, 23, 29, 31–33, 35–37

ISCD *Institut des Sciences du Calcul et des Données.* 1, 46, 72

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. 111, 119, 136, 150, 152

OBB *Oriented Bounding Box.* 95

RIR Réponse impulsionnelle d'une salle, ou *Room Impulse Response.* 59, 73, 76, 80, 86–88, 113, 116, 117, 137, 143

RMS Racine carrée de la moyenne des carrés, ou *Root Mean Square.* 60

RT₆₀ Temps de réverbération pour que l'énergie diminue de 60dB, ou *Reverberation Time at 60dB.* 64, 76, 91, 96, 116, 117, 134, 136, 152, XV, XVI

RVB Système de codage informatique des couleurs combinant et paramétrant les niveaux des trois couleurs primaires : *Rouge, Vert, Bleu.* 47

SPL Niveau de pression acoustique, ou *Sound Pressure Level.* 60, 111, 118, 136, 143, 144, 150, 152, XII

T₃₀ **RT₆₀** exprimé à partir de l'extrapolation de l'énergie entre -5 et -35dB. 111, 116, 136, 143, 150, 152, XII

T_s Exprime le centre de gravité temporel de la réponse impulsionnelle de la salle, c'est à dire le temps pour lequel la moitié de l'énergie sonore totale est reçue. 111, 118, 136, 142, 143, 150, 152, XII

UPMC *Université Pierre et Marie Curie.* 1

Annexe C

Glossaire

ADITUS Portes conduisant de l'exterieur à l'*orchestra*. i, 7, 11, 12, 19, 26, 27, 29–31, 34, 37, 38, 43, 132, 143–145, IV, V, VIII, XVIII, XIX

AMBULACRE Galerie circulaire permettant de se déplacer sour la *cavea*. 12–14, 26, 27, 39

ARÊTIER Pièce de charpente ou d'étanchéité qui forme l'angle saillant ou l'arête de la croupe d'un toit. 15, 36

ARMATURE Une Armature dans *Blender* peut être considérée comme semblable à l'armature d'un vrai squelette, et tout comme un squelette réel, une Armature peut être constituée de nombreux Os. Ces Os peuvent être déplacés et tout ce à quoi ils sont attachés ou associés se déplacera et se déformera de manière similaire¹. 45

AULOS Instrument à vent précurseur du hautbois, très utilisé durant toute l'Antiquité au cours de rites religieux et sociaux. Appelé *aulos* dans la Grèce antique et *tibia* dans la Rome antique, c'est un instrument à anche battante, simple ou double, composé principalement d'un tuyau percé de trous, joué le plus souvent par paires.. 146

BAKING Action permettant d'interpoler une animation et d'affecter à chaque **keyframe** les valeurs correspondantes. 45

BASILIQUE Large pièce de forme quasi-carré qui flanque le mur de scène et les *parascae-nium*. i, 7, 9, 10, 12, 15, 19, 24, 31–34, 36, 44, 144, 148, XIX

BLATEUS Balustrade de pierre ne dépassant pas un mètre de hauteur qui ceinturait l'arrière de l'*orchestra* et le séparait de la *cavea*. Il ménageait un couloir de circulation au pied de la *cavea* et isolait les sièges des notables placés sur les gradins de l'*orchestra*. 11, 34, 135

CAVEA Désigne l'ensemble des rangées concentriques composant les gradins. i, 5, 7, 8, 11, 12, 16, 17, 19, 22–31, 36–39, 43, 44, 132, 143, 144, 147–149, 152, I, XVII–XIX

COMPLEXITÉ Domaine de l'informatique qui étudie la quantité de ressources (temps, espace mémoire, etc) dont a besoin un algorithme pour résoudre un problème. 90

CONSOLE Pièce de maçonnerie servant à supporter les mâts du *velum*. 9, 17

CUNEUS Groupe de gradins representant une portion de la *cavea*. 12, 29, 37

DIRAC La distribution de Dirac vérifie la propriété fondamentale que, pour toute fonction : $x \mapsto \varphi(x)$ lisse : $\langle \delta, \varphi \rangle = \varphi(0)$. 66

1. Manuel *Blender* - Armatures

DIRICHLET Pour une équation aux dérivées partielles, par exemple :

$$\Delta y + y = 0$$

la condition aux limites de Dirichlet sur le domaine $\Omega \subset \mathbf{R}^n$ s'exprime par :

$$y(x) = f(x), \quad \forall x \in \partial\Omega$$

où f est une fonction définie sur la frontière $\partial\Omega$. [65](#)

EXÈDRE Du latin *exedra* qui signifie "qui est dehors", l'exèdre est à l'origine une structure architecturale indépendante conçue comme une salle de conversation équipée de sièges ou de bancs. Sur une façade de bâtiment, une exèdre se voit comme un renfoncement souvent semi-circulaire ou rectangulaire. [9](#), [10](#), [32](#), [146](#), [147](#)

HYPOSCAENIUM Fosse situé sous la scène comportant notamment le mécanisme du rideau de scène. [5](#), [10](#), [34](#)

IMA CAVEA Désigne le premier niveau (niveau inférieur) de la cavea. [12](#), [27](#), [38](#)

IMPÉDANCE Caractérise la résistance d'un milieu au passage d'une onde acoustique. [67](#)

KEYFRAME Marqueur temporelle stockant la valeur d'un paramètre. [45](#), [XVII](#)

MAENIANUM Portions de la cavea séparées par un *podium* et rassemblant un ensemble de gradins. [i](#), [12](#), [19](#), [24–26](#), [28–30](#), [35–37](#), [143](#), [145](#), [152](#), [154](#), [XIX](#)

MEDIA CAVEA Désigne le deuxième niveau (niveau médian) de la cavea. [12](#)

MODIFICATEUR Outil *Blender* permettant d'affecter automatiquement à des objets des opérations non-destructives. [22](#), [23](#), [27](#), [30](#), [31](#), [44](#), [49](#)

MODIFICATEUR "BOOLÉEN" Permet des opérations d'addition, de soustraction ou d'intersection entre objets. Il est utilisé par exemple pour faire des trous dans les murs pour les portes. [23](#), [26](#), [27](#), [30–34](#), [43](#)

MODIFICATEUR "DÉCIMER" Permet de réduire le nombre de vertices ou de faces d'un objet tout en conservant au maximum sa forme.. [132](#)

MODIFICATEUR "MIROIR" Permet de recopier un objet en miroir par rapport à un ou plusieurs axes. Il est utilisé par exemple pour symétriser les marches d'escalier longeant les *aditus*. [26](#), [27](#), [29–31](#), [38](#), [43](#)

MODIFICATEUR "SOLIDIFIER" Permet de donner une épaisseur paramétrable à un objet plan. Il est utilisé par exemple pour créer la largeur d'une marche d'escalier ou pour les *aditus*. [23](#), [27](#), [29–31](#), [35](#), [38](#)

MODIFICATEUR "TABLEAU" Permet de répéter n fois un objet en disposant les copies dans le repère absolu, le repère relatif à l'objet source ou bien par rapport à un objet tiers. Il est par exemple utilisé pour créer des escaliers en répétant n fois la première marche. Pour répéter l'objet selon une courbe, on peut lier le modificateur à un objet vide (empty) qui aura subit une rotation. Cela est utilisé par exemple pour répéter les colonnes de la *porticus in summa cavea*. [23](#), [26–29](#), [35–38](#), [43](#)

MODIFICATEUR "VISSEZ" Permet de faire une extrusion circulaire autour du centre de l'objet. Il est possible de choisir le raffinement de l'extrusion donc le nombre d'extrusion linéaire. Il est utilisé par exemple pour créer la *cavea* à partir de son plan de coupe. [23](#), [25–27](#), [29](#), [31](#), [35](#), [38](#), [44](#)

NEUMANN Pour une équation aux dérivées partielles, par exemple :

$$\Delta y + y = 0$$

la condition aux limites de Neumann sur le domaine $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ s'exprime par :

$$\frac{\partial y}{\partial \vec{n}}(x) = f(x), \quad \forall x \in \partial\Omega$$

où f est une fonction scalaire connue définie sur la limite $\partial\Omega$ et \vec{n} est le vecteur normal à la frontière $\partial\Omega$. 65

OCTREE Structure de données de type arbre dans laquelle chaque nœud peut compter jusqu'à huit enfants. En trois dimensions, créer un octree revient à découper une cube en son milieu sur chacun de ses axes.. 55, 92–99, 105, 121, X

ODÉON Petit théâtre couvert dédié exclusivement aux spectacles musicaux. 8, 129

ORCHESTRA Espace semi-circulaire (chez les romains) ou circulaire (chez les Grecs) se situant entre la scène et le premier gradin. i, 7, 10, 11, 17, 19, 23, 34, 132, XVII, XIX

PARASCAENIUM Espace intermédiaire entre la scène et les **basiliques** comportant des escaliers pour atteindre les niveaux supérieurs. 7, 9, 10, 15, 32, 33, 36, 147, XVII

PARODOS Entrée menant à l'*orchestra* traversant les *aditus*. 10–12, 26, 29–31, 34, 38

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, 41, 45, 46

PILASTRE Faux pilier intégré au mur en ornement. 9, 43

PODIUM Massif de maçonnerie élevé au-dessus du sol et servant de soubassement. 12, 24, 26–28, 33, 132, XVIII

PORTICUS IN SUMMA CAVEA Arcade bordée de colonnes située au dessus du troisième *maenianum*. i, 12, 17, 19, 23, 27, 36, 38, 43, 47, 132, 142, 151, 152, XVIII

PORTICUS POST SCAENAM Arcade bordée de colonnes située à l'extérieur du théâtre et adossée au mur de scène. 8, 9, 33

POSTSCAENIUM Mur séparant la scène de l'extérieur comportant des salles pouvant servir de coulisses. i, 5, 7, 9, 10, 15, 16, 32, 33, 44, 132, 148

PRECINCTION Palier (aussi appelé *diazoma* chez les grecs) situé au-dessus de chaque *maenianum* et sur lequel s'ouvre les *vomitorium*. 12, 25–30, 34, 37, 135, 144

PULPITUM Ensemble de l'estrade sur lequel jouent les acteurs orné en son front par un petit mur de marbre décoré. i, 7, 9, 10, 15, 19, 34, 35, 129, 132, 135

SPÉCULAIRE Relatif au miroir. 67

SUMMA CAVEA Désigne le troisième niveau (niveau supérieur) de la cavea. 12

VELUM Grande pièce de tissu généralement en lin tirée au dessus de la *cavea* pour protéger les spectateurs du soleil. i, 7–9, 12, 15–17, 23, 41–45, 130, 132, 152, 153, XVII

VOMITORIUM Issues permettant aux spectateurs d'accéder aux gradins. 12, 27, XIX

WAVEFRONT AUDIO FILE FORMAT Le format RIFF, sur lequel repose le format WAV, définit une structure de fichier qui repose sur une succession de blocs de données (chunks).

Chaque bloc est identifié par 4 octets (4 symboles ASCII) suivis de la taille du bloc codé sur 4 octets. Si un lecteur rencontre un bloc qu'il ne connaît pas, il passe au suivant. Un fichier wav doit au minimum contenir un bloc appelé <fmt> (format) et un bloc appelé <data>. Le bloc <fmt> doit être positionné en amont du bloc <data>.

- Le bloc <fmt> contient les métadonnées techniques, c'est-à-dire les informations relatives au codage du flux audio, informations indispensables pour interpréter les données.
- Le bloc <data> contient la charge (payload), c'est-à-dire les données audio utiles.

. 87

WAVEFRONT OBJ Format de fichier contenant la description d'une géométrie 3D. Les fichiers OBJ sont au format ASCII et se présente de la façon suivante :

- Le nom de l'objet est précédé d'un o
- Le nom du matériau est précédé de usemtl (un fichier .mtl accompagne en général les fichier obj)
- Les coordonnées de sommets sont précédés d'un v
- Les coordonnées de textures sont précédés d'un vt
- Les coordonnées de normales sont précédés d'un vn
- Chaque face est ensuite définie par un ensemble d'indices faisant référence aux coordonnées des points, de texture et des normales définies précédemment

. 112