

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 impulsionnelle	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
III Analyse acoustique du théâtre d'Orange	127
Introduction	129
9 Analyse en configuration initiale	131
9.1 Configuration du maillage	132
9.2 Analyse de la réponse impulsionnelle	134
10 Test de configurations	141
10.1 Décor du front de scène	142
10.2 Position des spectateurs	143
10.3 La source et le mur de scène	146
10.4 Présence de spectateurs	152
10.5 Les couvertures	152
11 Comparaison avec d'autres théâtres antiques	157
Conclusion	161
Références	163
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. 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. [?, 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

« 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	132
9.2 Analyse de la réponse impulsionale	134

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 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 mât 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 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)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. 9.1). 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吸吸 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., 2013, p.43]

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

3. [FORMIGÉ, 1923, p.34]

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 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.

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

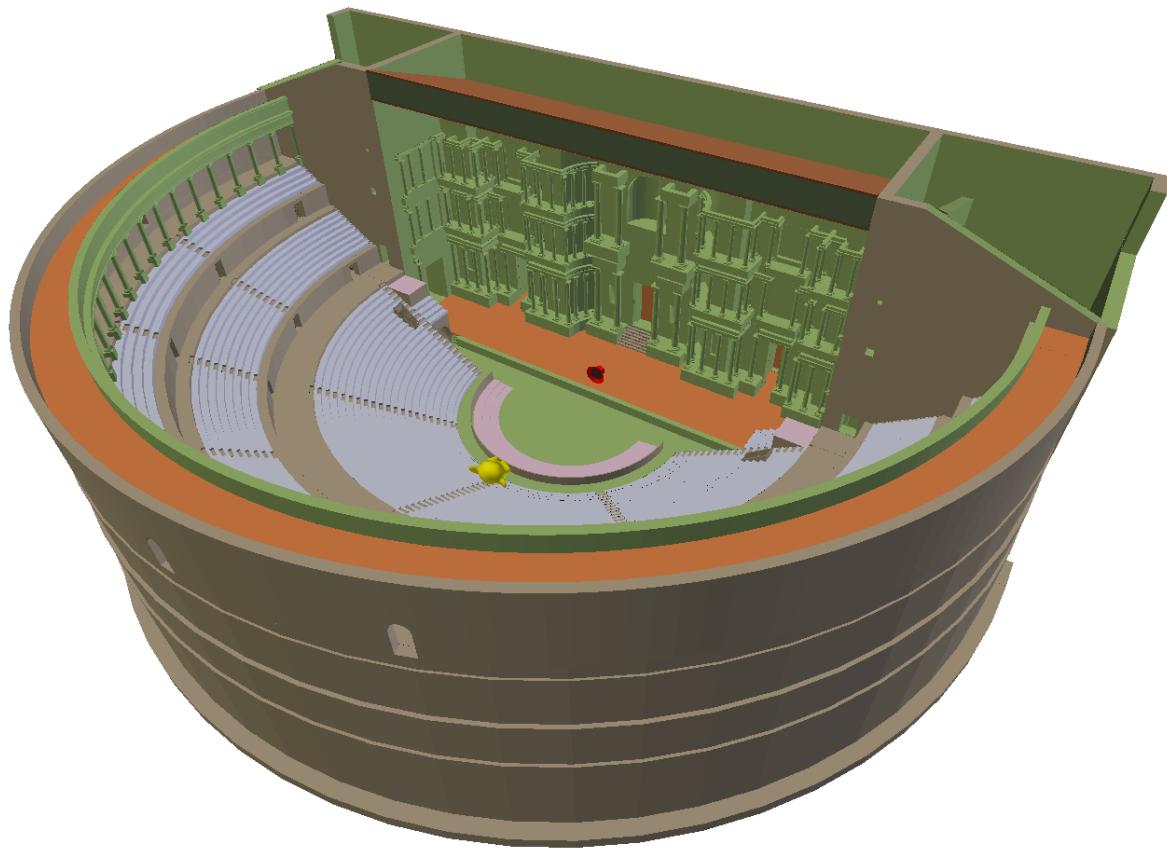


FIGURE 9.1 – Représentation des matériaux sur le théâtre d'Orange : Calcaire (beige), Marbre (vert), Bois (orange), Audience sur gradins (gris), Audience sur siège en bois (rose) ainsi que la source (rouge) et le récepteur (jaune) dans la configuration initiale.

9.2 Analyse de la réponse impulsionale

La figure 9.2 et le tableau 9.2 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 9.2b et 9.2c 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 9.2c 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. 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). 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 effet 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 atténusés par le matériau arrivent en phase et jouent donc un rôle non négligeable dans la réverbération (voir fig. 9.4b). Il y a ensuite deux grands pics à -10dB issus de multiples réflexions. Le premier est dû aux réflexions successives sur le *balteus*, le font 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. 9.3a). C'est finalement à proximité du plan source-récepteur que se concentre la majeur 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. 9.3b). En observant les sources-images dont le niveau est supérieur à -30dB par rapport au son direct (voir fig. 9.4), on peut confirmer la provenance des pics d'énergie de la figure 9.2b décrite précédemment.

La tableau 9.2 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.Jouhaneau ¹⁰ 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 ¹¹. Ce manque de compréhensibilité est corroboré par l'analyse des autres facteurs. Tout d'abord, on constate que la définition **D₅₀** et

10. [JOUHANEAU, 1997, p.209]

11. [JOUHANEAU, 1997, p.218]

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 1500Hz¹². Cependant, seuls les hommes étaient acteurs de théâtre à l'époque impériale. On en conclue 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 +3dB¹³. 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.

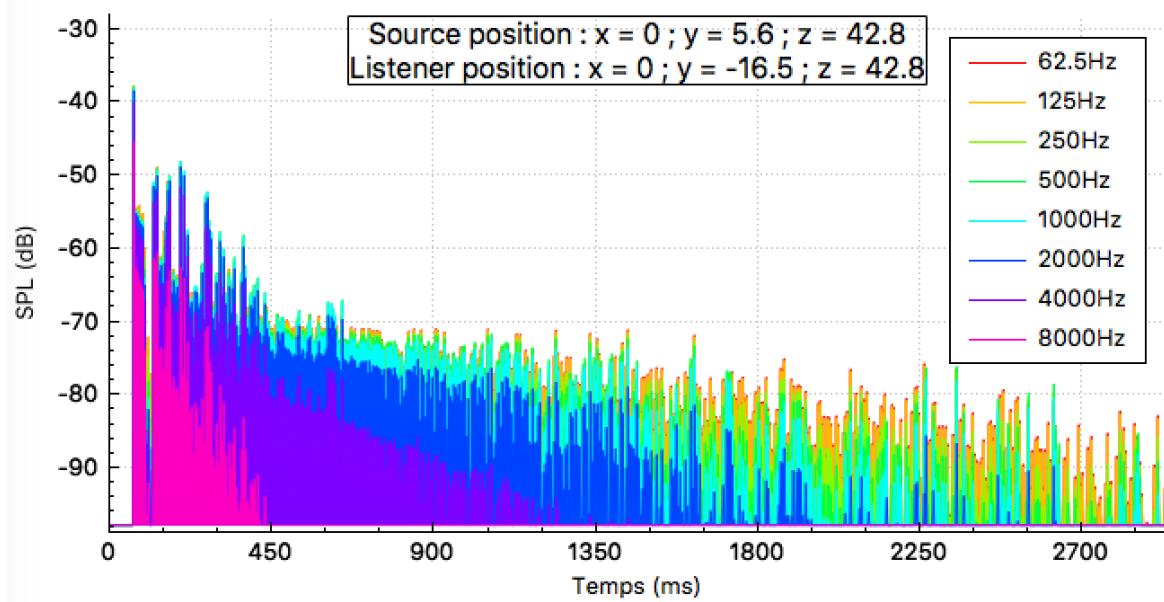
niveau de pression acoustique ou SPL (Sound Pressure Level)

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

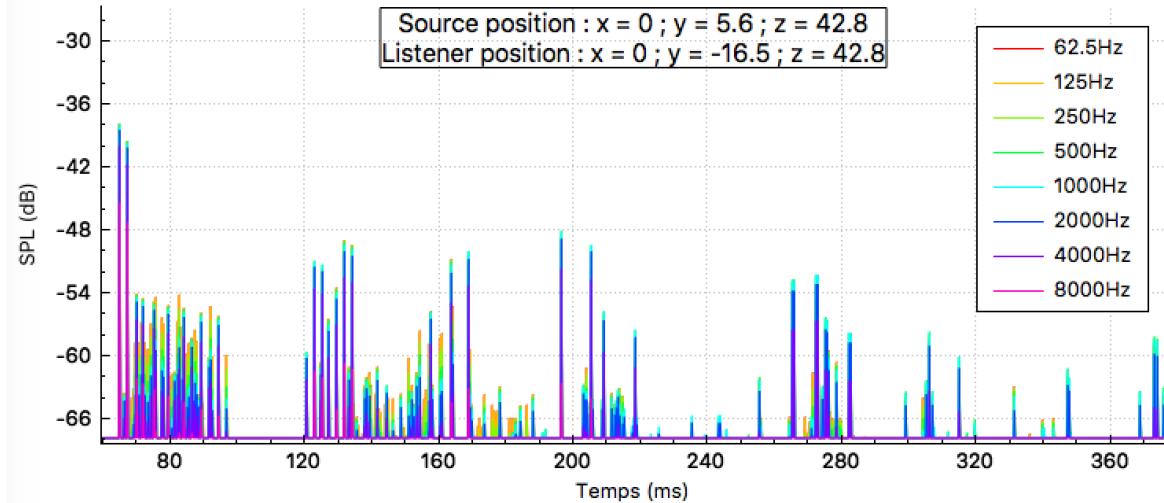
TABLEAU 9.2 – Facteurs perceptifs pour une source en [0; 5.6; 42.8] et un auditeur en [0; -16.5; 42.8] et 1000000 rayons dans la configuration initiale.

12. [WIKIPÉDIA, Mécanismes vocaux]

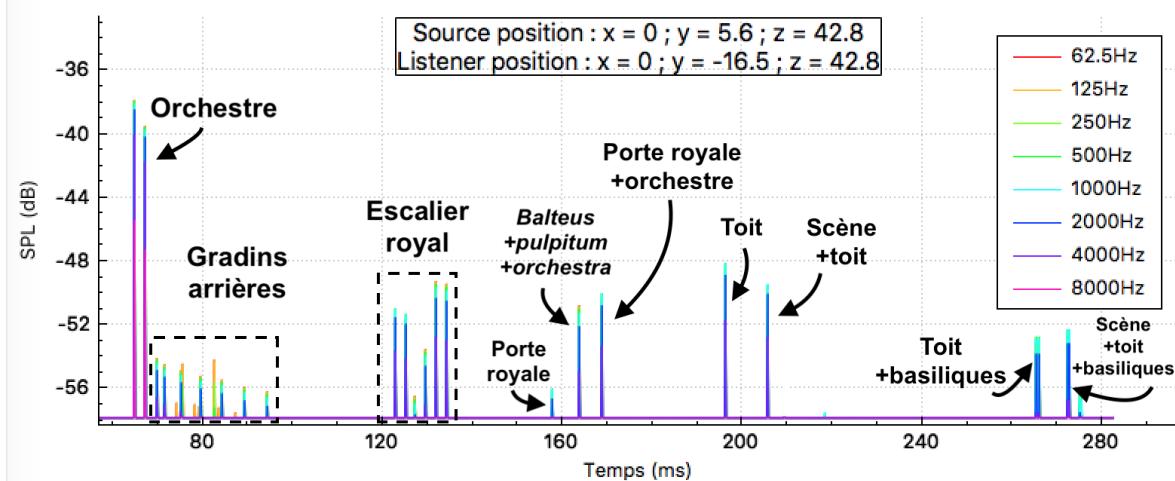
13. [KRAUSS et collab., 2009, p.59]



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

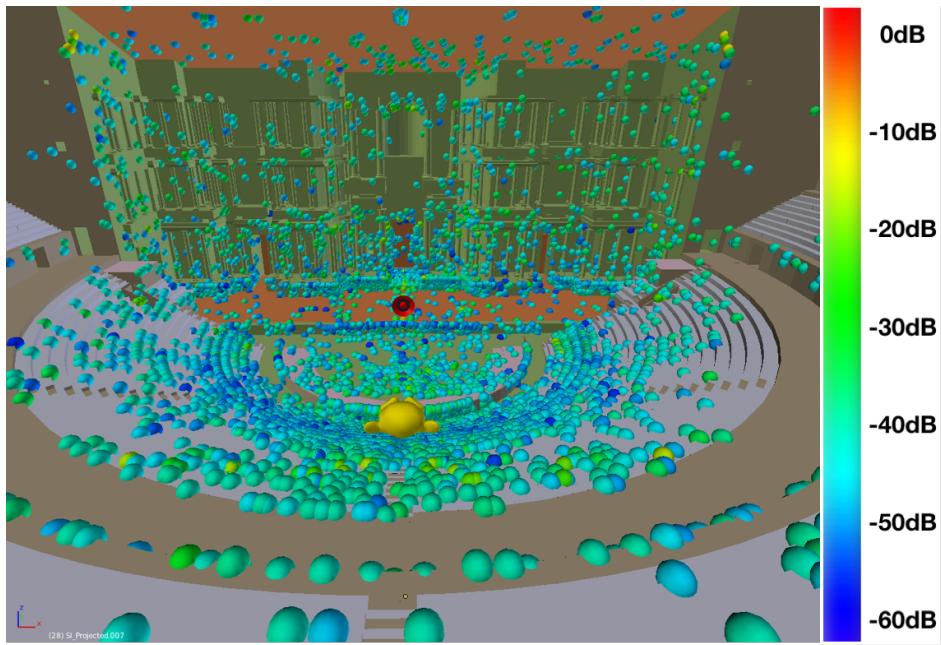


(b) Réponse impulsionnelle jusqu'à -30dB.

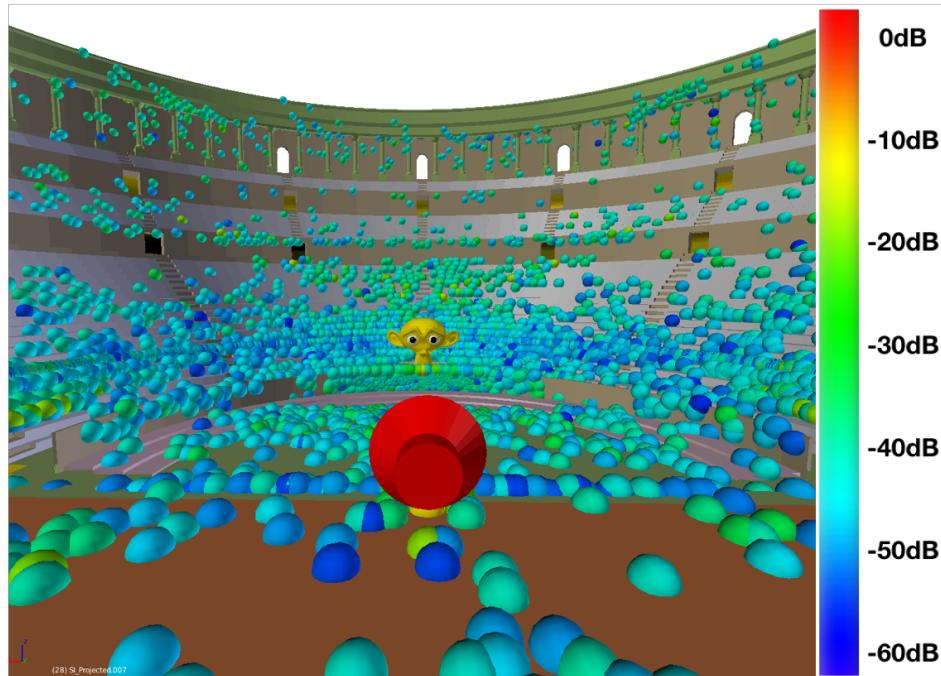


(c) Réponse impulsionnelle jusqu'à -20dB.

 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) 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.

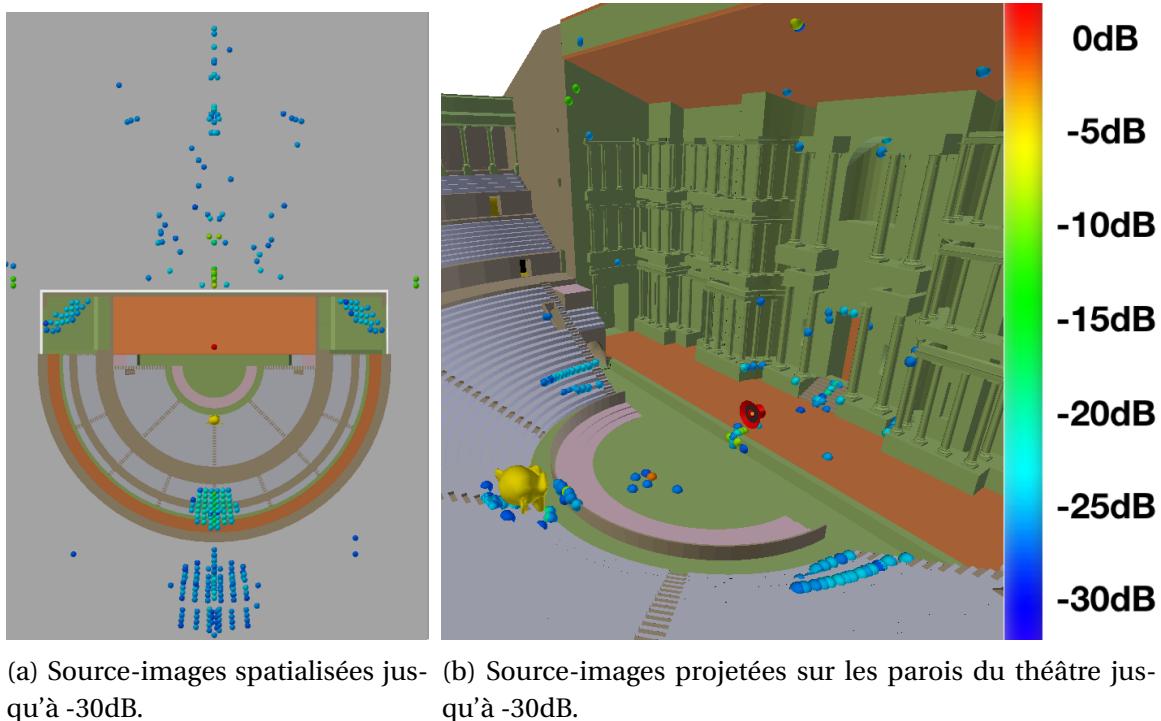


FIGURE 9.4 – Source-images dans le théâtre d'Orange dans sa configuration initiale pour 1 million de rayons jusqu'à -30dB.

Chapitre 10

Test de configurations

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

Queen

Sommaire

10.1 Décor du front de scène	142
10.2 Position des spectateurs	143
10.3 La source et le mur de scène	146
10.4 Présence de spectateurs	152
10.5 Les couvertures	152

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* 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 10.1 présente les facteurs perceptifs de cette configuration sans décor. En les comparant au tableau 9.2 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.

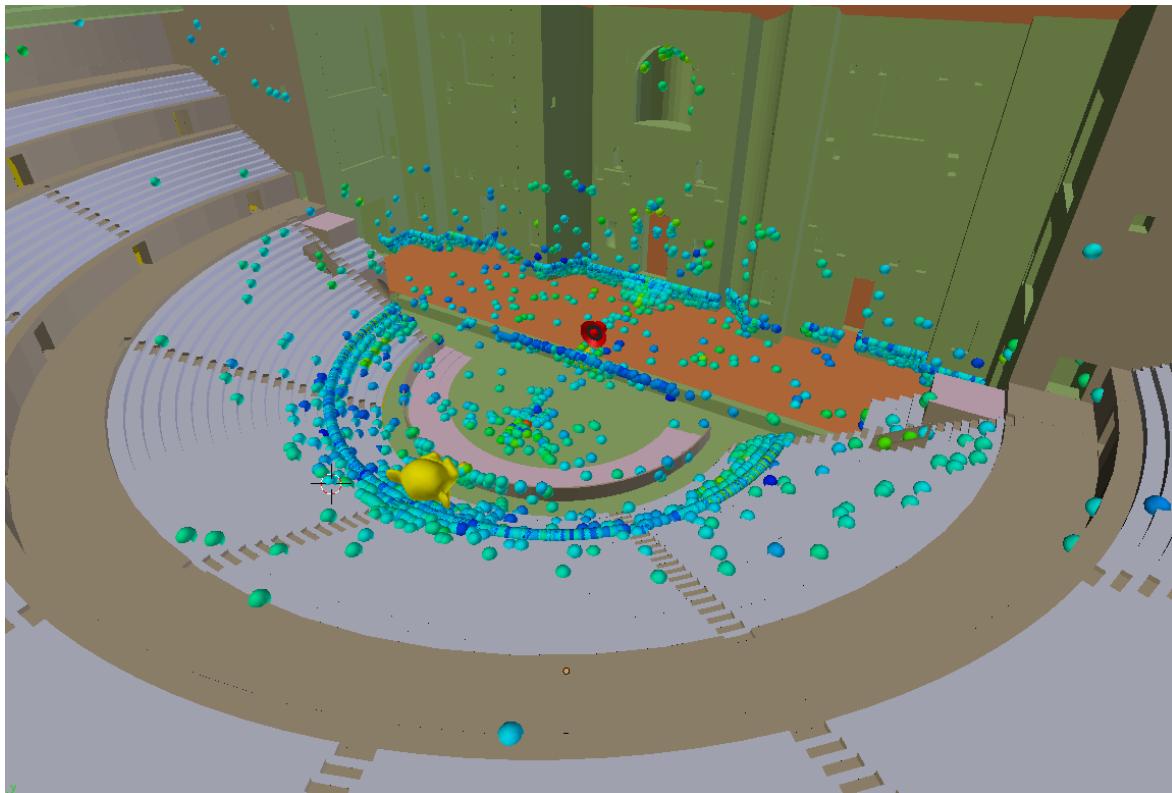


FIGURE 10.1 – Source-images projetées sur les parois du théâtre jusqu'à -60dB sans la décoration du front de scène.

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. 10.2). 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 10.2 plusieurs choses. Tout d'abord, le niveau acous-

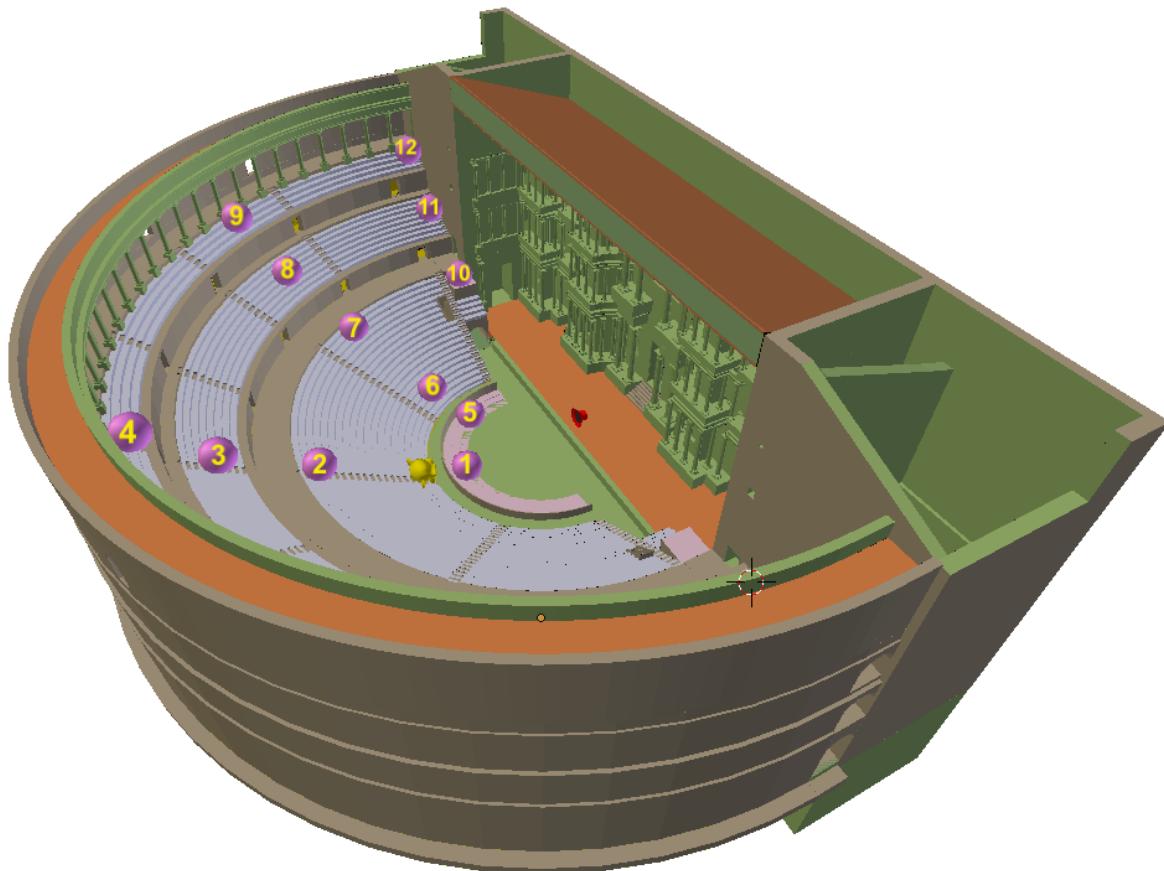


FIGURE 10.2 – Douze positions d’auditeurs (rose) à comparer à la position initiale (jaune).

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 10.3 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. 10.4) 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.

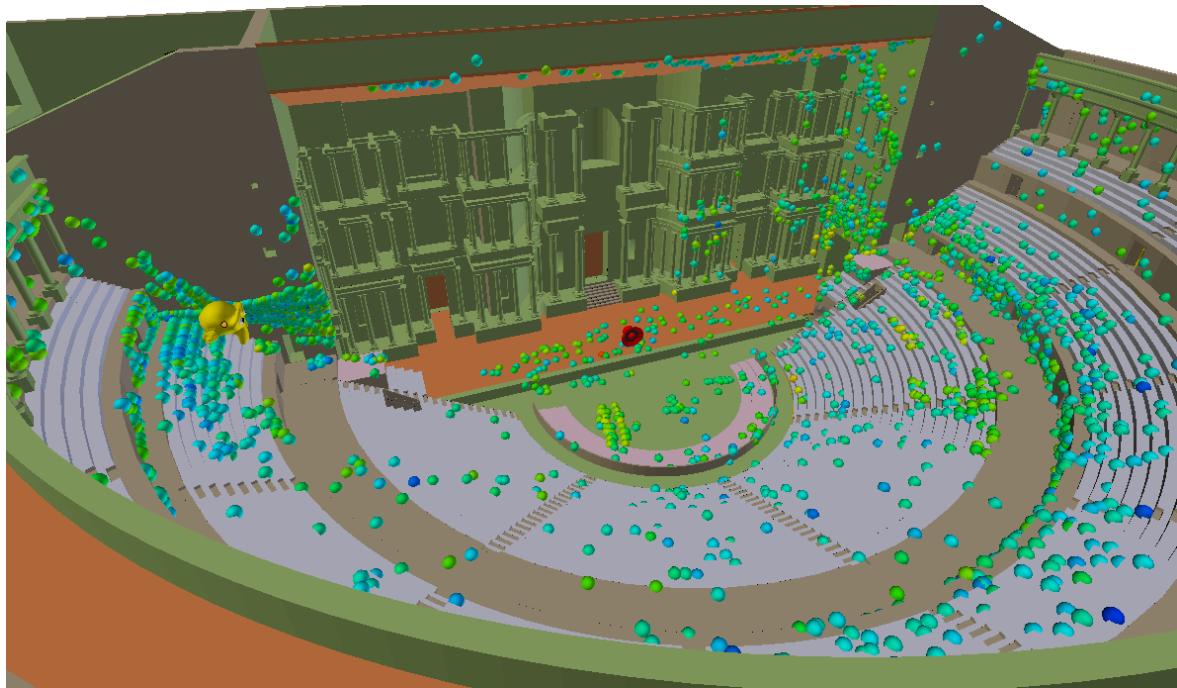


FIGURE 10.3 – Projection des sources-images pour un auditeur situé sur le deuxième *maenianum* au dessus de l'*aditus* occidental pour 1 000 000 de rayons.

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.

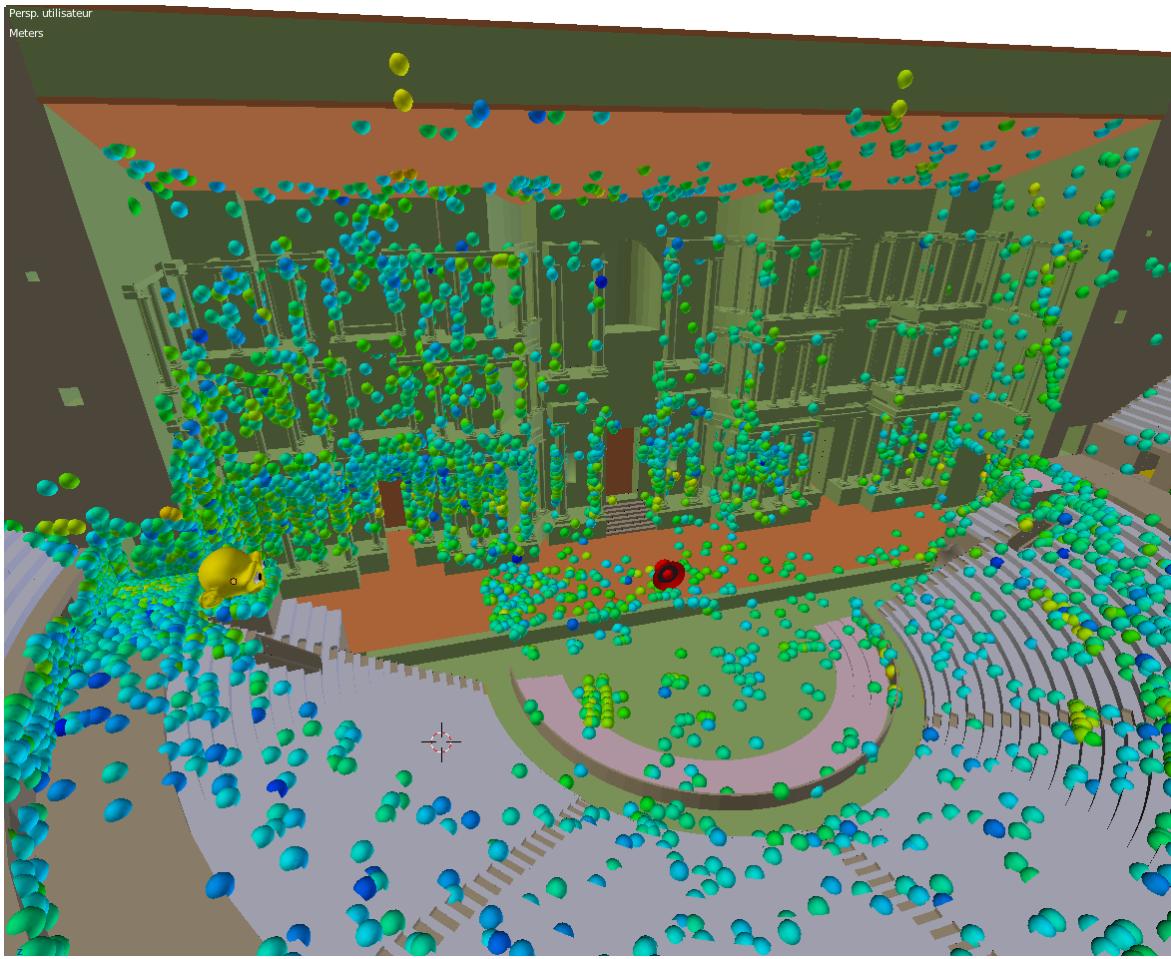


FIGURE 10.4 – Projection des sources-images pour un auditeur situé sur la tribune occidentale pour 1 000 000 de rayons.

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 est la position de la source sonore. La figure 10.5a 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

2. [?], p.65]

3. [?], p.33]

4. [?]

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 10.5b représente les réflexions sur le mur 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 10.5c et 10.5d, 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 10.5d 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*.

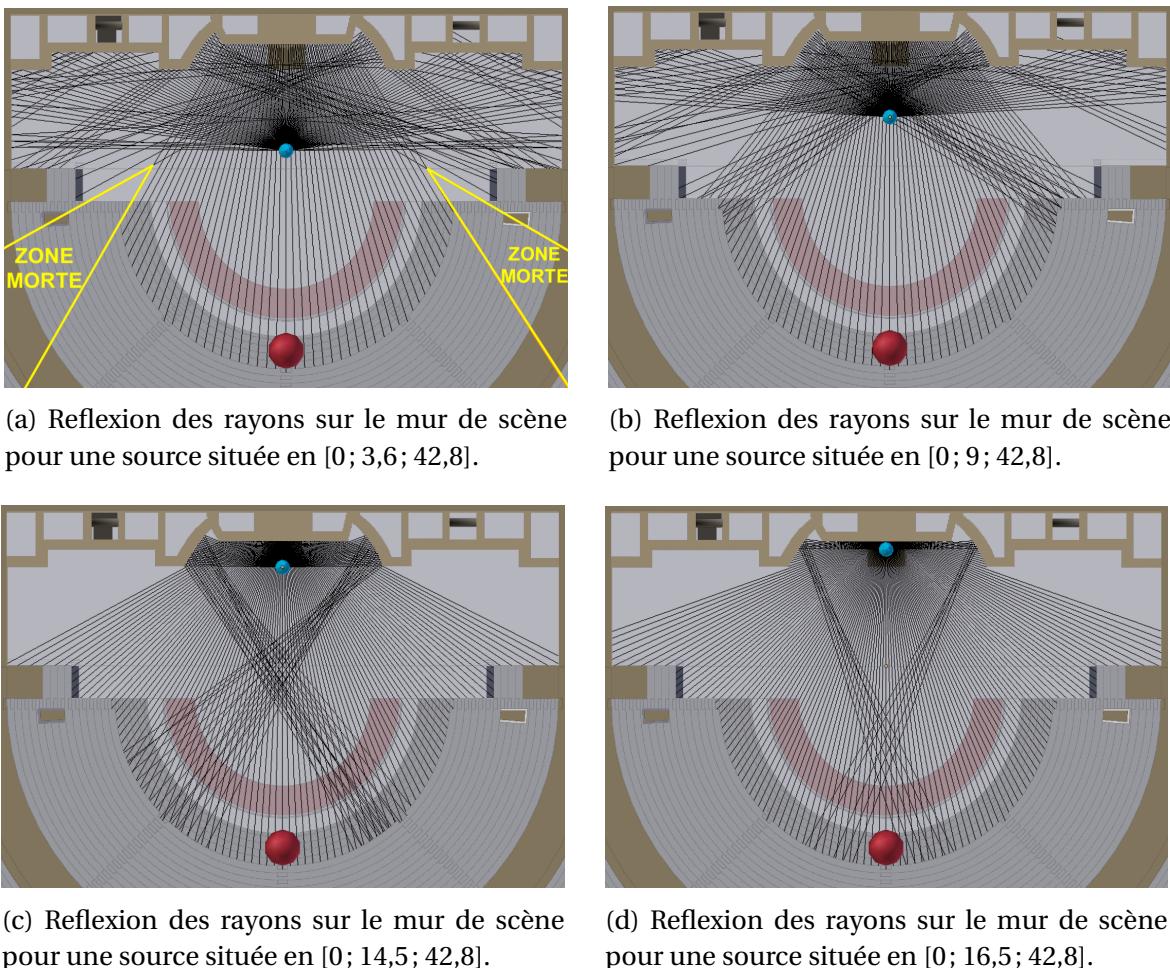


FIGURE 10.5 – Reflexion des rayons propagés depuis une source vers le mur de scène dans un plan horizontal.

Si on se place maintenant dans le plan vertical YZ (ou vu de profil). Nous avons vu précédemment que la réflexion 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 10.6). 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 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 réflexion sur l'orchestre pour amplifier le son.

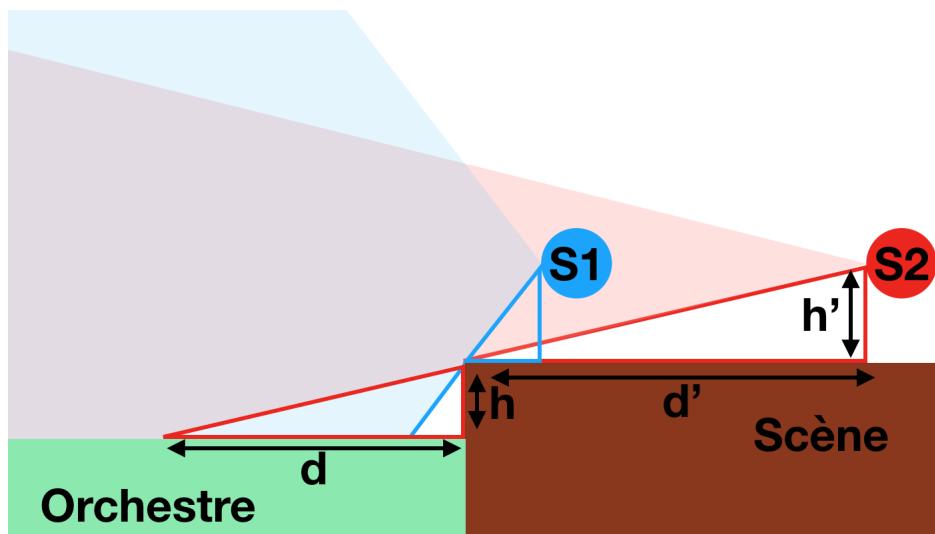


FIGURE 10.6 – Vu de profil de la propagation sonore à partir de deux sources S1 et S2. Proportion de signal réfléchi sur l'orchestre plus faible pour S2 que pour S1.

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 *basiques*. On constate sur la figure 10.7 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 spectateur 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 10.3 représente le temps de réverbération et les indices de compréhensibilité pour différentes positions de spectateurs (voir fig. 10.8). 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 *postscænium* et notamment les différents passages permettant de circuler à l'intérieur du mur de scène nous constatons que l'accès à cette grande niche

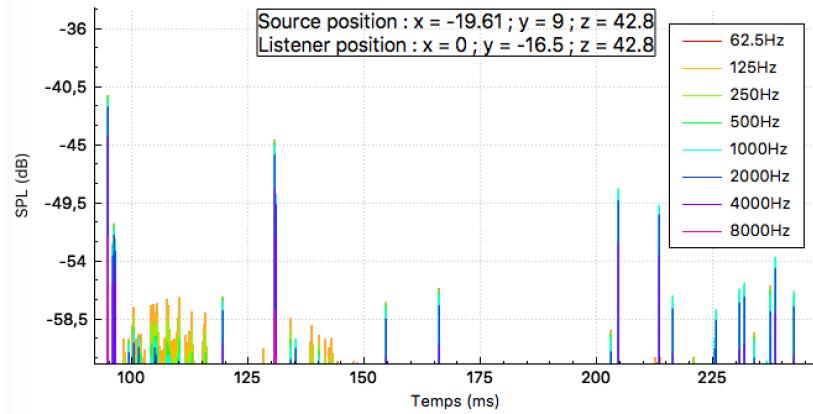


FIGURE 10.7 – Réponse impulsionnelle jusqu'à -20dB pour une source latérale située en [-19.61 ; 9 ; 42.8] et un récepteur en position initiale [0 ; -16.5 ; 42.8] pour 1000000 de rayons.

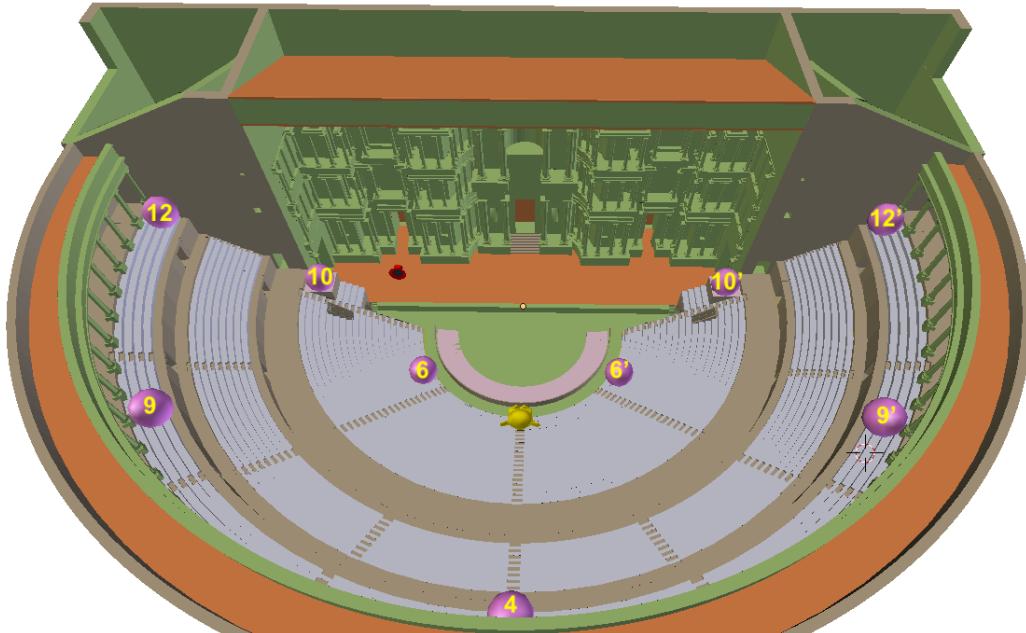


FIGURE 10.8 – Répartition des récepteurs pour le test de source latérale.

centrale est praticable et qu'il existe des ouvertures pour y faire entrer des personnes. La figure 10.9 montre la trajectoire des rayons lorsque la source est située dans la niche. On 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 10.4 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 divins avec une voix d'une puissance surdimensionnée et d'une grande clarté.

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.

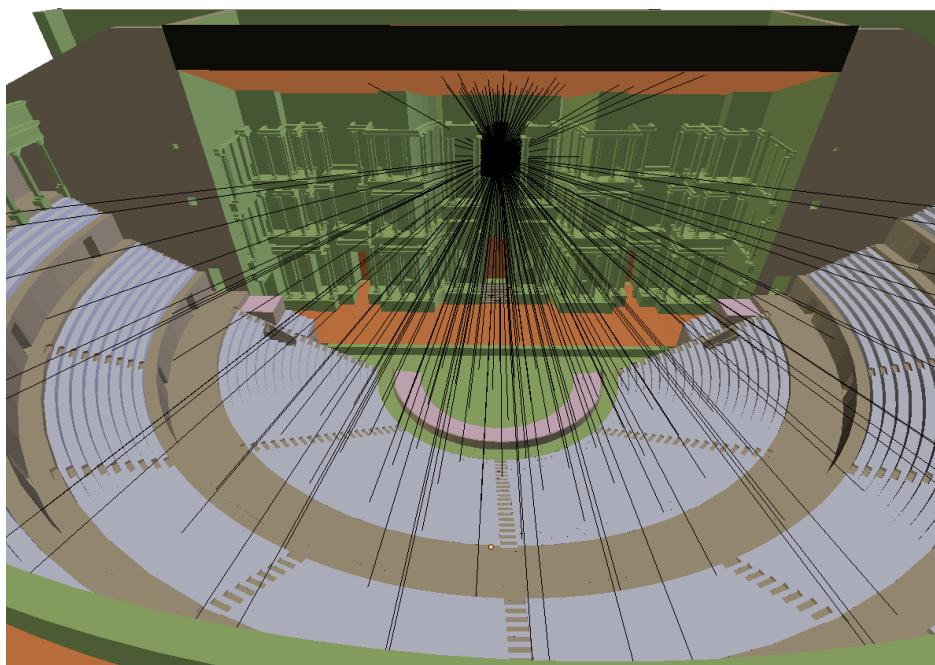


FIGURE 10.9 – Propagation de 1000 rayons depuis la niche centrale.

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 manière⁵. Ainsi, nous comparons les facteurs perceptifs préalablement établis à différents emplacements pour un théâtre plein (voir section 10.2), un théâtre vide et un théâtre rempli aléatoirement 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 à priori composés de caisson qui auraient apporté un effet de diffusion (voir fig. 10.10). 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 10.11 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,

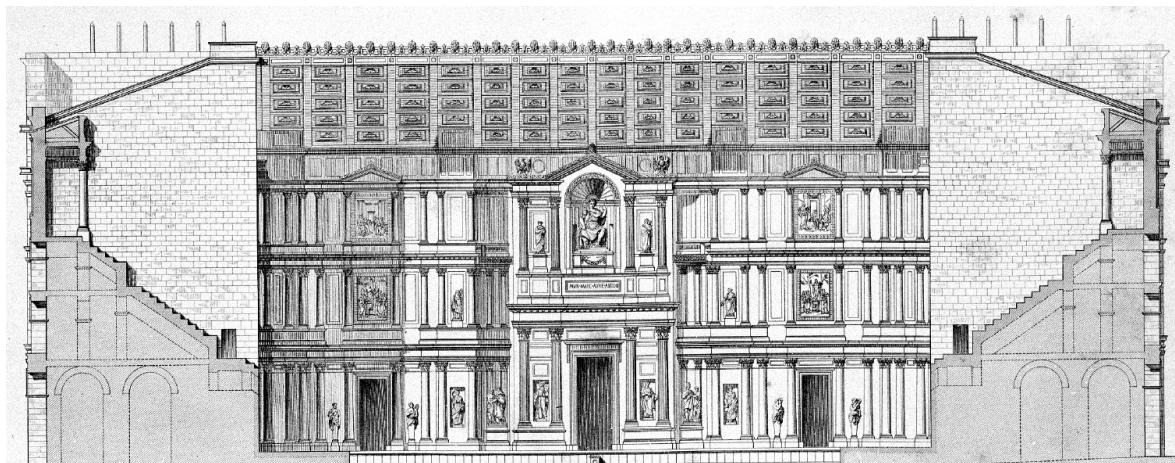


FIGURE 10.10 – Restitution du bâtiment de scène par A. Caristie représentant le plafond à caissons⁶.

avec et sans toit (voir fig 10.12). Nous constatons que le toit n'a d'impact que sur les premières réflexions et qu'il va générer principalement deux échos.

Le tableau 10.5 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 9.2. On constate grâce au tableau A.1 que cela est vrai quelle que soit la position du spectateur (voir section 10.2). 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 fait piéger. Si cette astuce peut fonctionner pour la musique elle produira l'effet inverse pour la parole puisque le

5. [JOUHANEAU, 1997, p.212]

6. [?, Pl. III]

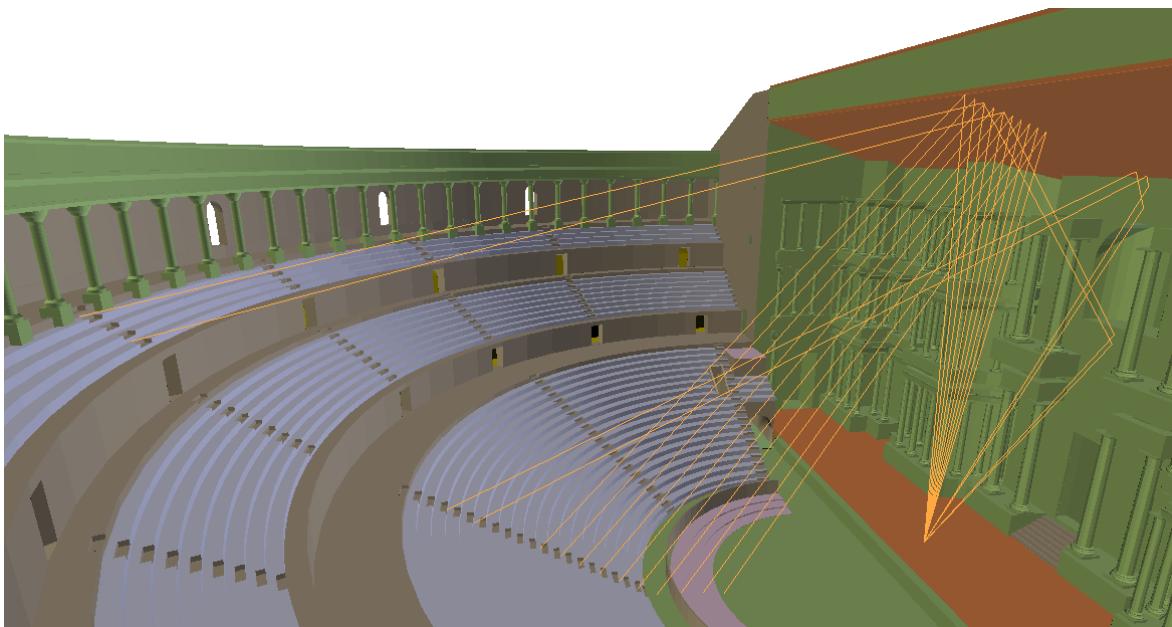


FIGURE 10.11 – Angle des rayons se propageant depuis l'avant scène et se réfléchissant successivement sur le mur de scène et sur le toit.

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
RT₆₀ (ms)	3155	3130	2822	2606	2420	2057	1425	618
SPL (dB)	-32	-32	-32	-32	-33	-34	-36	-42
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
LF₈₀ (dB)	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001

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 sans plafond au dessus de la scène.

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. Cette partie des gradins étant plutôt réservée au bas peuple ou aux esclaves, nous pouvons nous demander si la *porticus in summa cavea* eu vraiment été pensée avec ce rôle acoustique ou si elle n'avait qu'un pur but pratique et esthétique. La figure 10.13 confirme que les spectateurs situés au sommet de la *cavea* bénéficient principalement des réflexions sur la *porticus in summa cavea*.

Le *velum* était à priori composé de toiles de lin⁷ 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 connaitre les coefficients d'absorption adéquates? Nous savons 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

7. [FORMIGÉ, 1923, p.38]

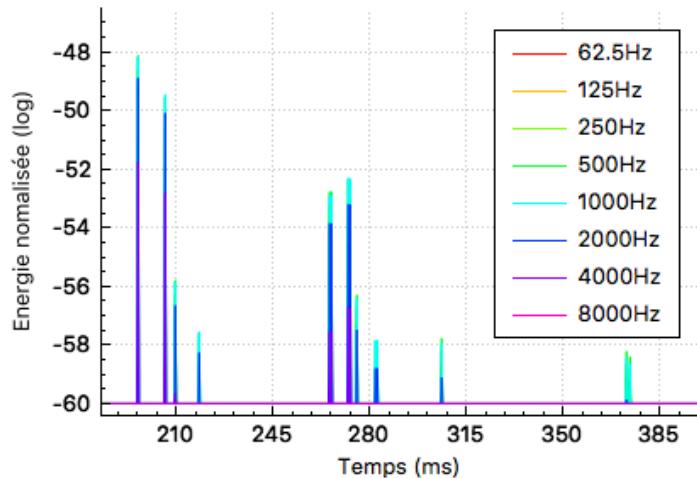


FIGURE 10.12 – Différence entre les réponses impulsionnelles avec et sans toit pour une source et un récepteur positionnés dans la configuration initiale pour 1 000 000 de rayons.

et des déplacements de fibres légères, d'où transformation d'énergie. Ainsi, le tissu, absorbe beaucoup les hautes fréquences et transmet les basses fréquences.⁸. 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 à 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.

8. [?, Matériaux]

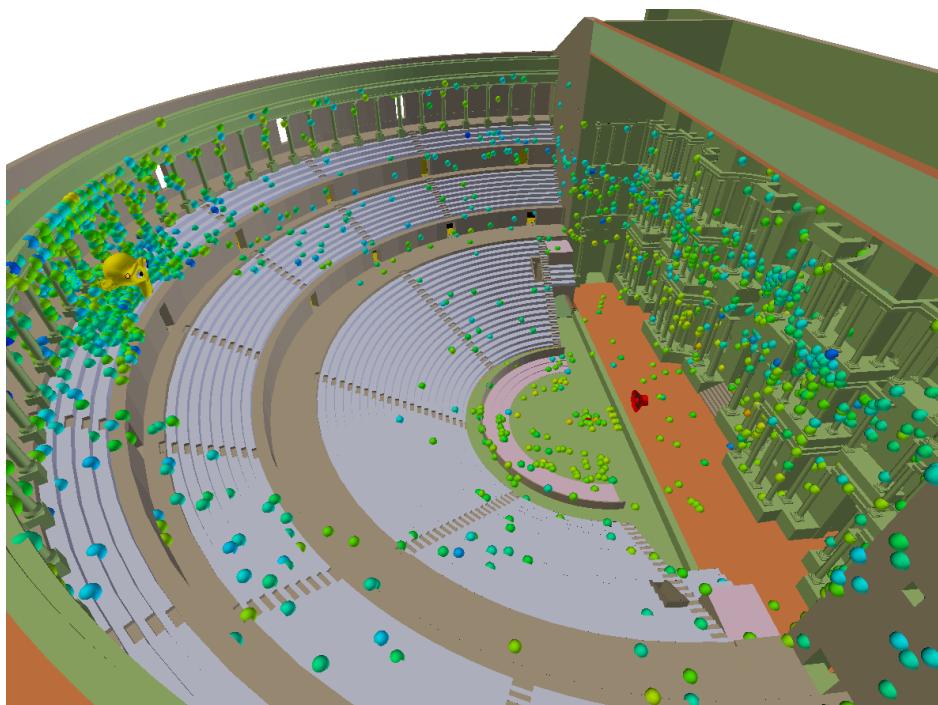


FIGURE 10.13 – Projection des sources-images pour un auditeur situé sur le troisième *maenianum* au niveau de l'axe central pour 1 000 000 de rayons.

Chapitre 11

Comparaison avec d'autres théâtres antiques

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

Platon

Citer ¹

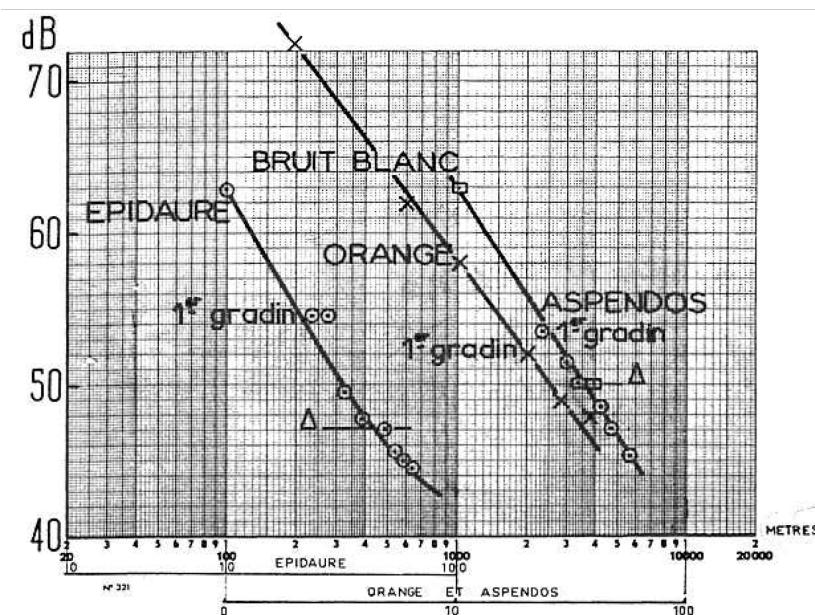


FIGURE 11.1 – Comparaison de l'intensité perçue entre les théâtre d'Epidaur, Aspendos et Orange².

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]

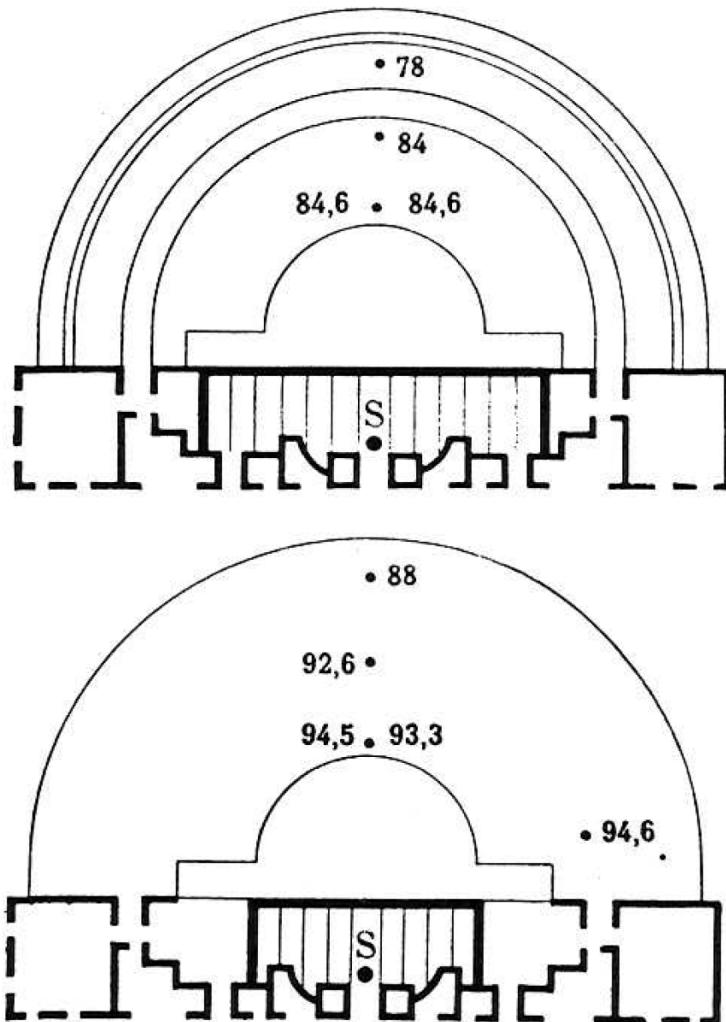
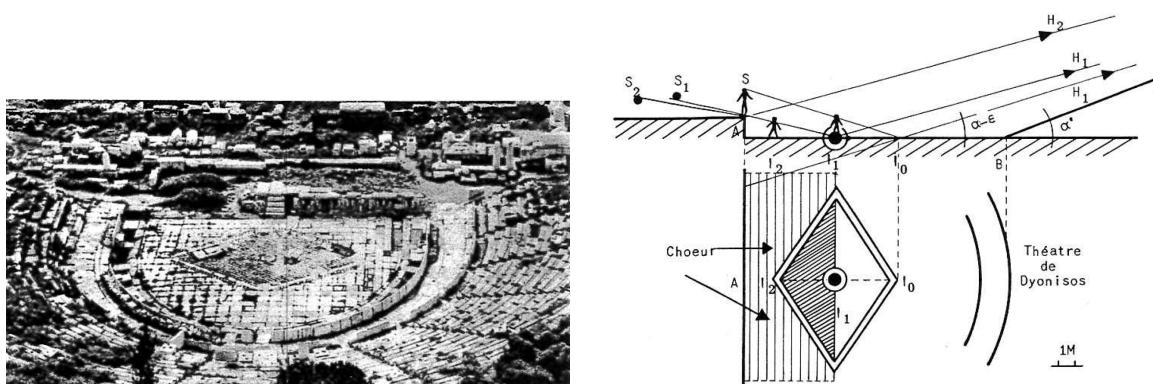


FIGURE 11.2 – Comparaison de la compréhensibilité à Orange, avec un mur (en haut) et à Vaison, sans mur (en bas)³.



(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

Nous avons vu dans cette partie que

Références

- ARNAUD, A. 1808, *Oeuvres complètes*, vol. Tome III, L'imprimerie de Valade. [130](#)
- 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. [132](#)
- BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE, J. 1838, *Livre de la Poétique d'Aristote*, Ladrange. [130](#)
- CANAC, F. 1967, *L'acoustique des théâtres antiques. Ses enseignements*, Éditions du centre national de la recherche scientifique, 15, quai Anatole-France - Paris VII. [129](#), [130](#), [158](#)
- 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. [130](#), [132](#), [142](#), [153](#)
- HAAS, H. 1951, *Influence de l'écho sur la compréhension de la parole*, vol. 1, Acoustica. [134](#)
- JOUHANEAU, J. 1997, *Acoustique des salles et sonorisation, Acoustique appliquée*, vol. 3, Conservatoire national des arts et métiers. [135](#), [152](#)
- KRAUSS, G., R. YEZOU et F. KUZNIK. 2009, «Acoustique du bâtiment», Cours-Institut national des sciences appliquées de Lyon. [136](#)
- MAUFRAS, M. C.-L. 1847, *Vitrue : De l'architecture*, vol. V, Panckoucke. [129](#)
- ODEON. «Odeon webpage», URL <https://odeon.dk/>. [132](#)
- 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. [158](#)
- WIKIPÉDIA. «Voix humaine», URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Voix_humaine. [136](#)

Annexe A

Annexes

A.1 Figures annexes

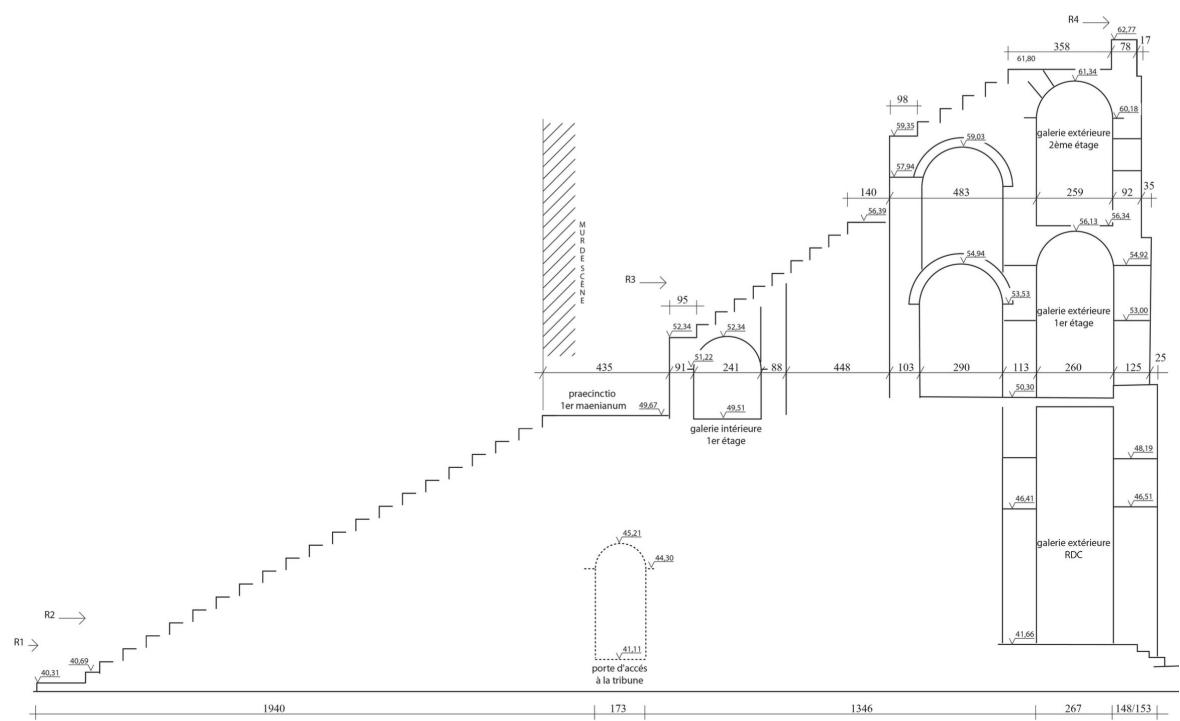


FIGURE A.1 – Coupe théorique sur la *cavea*¹.

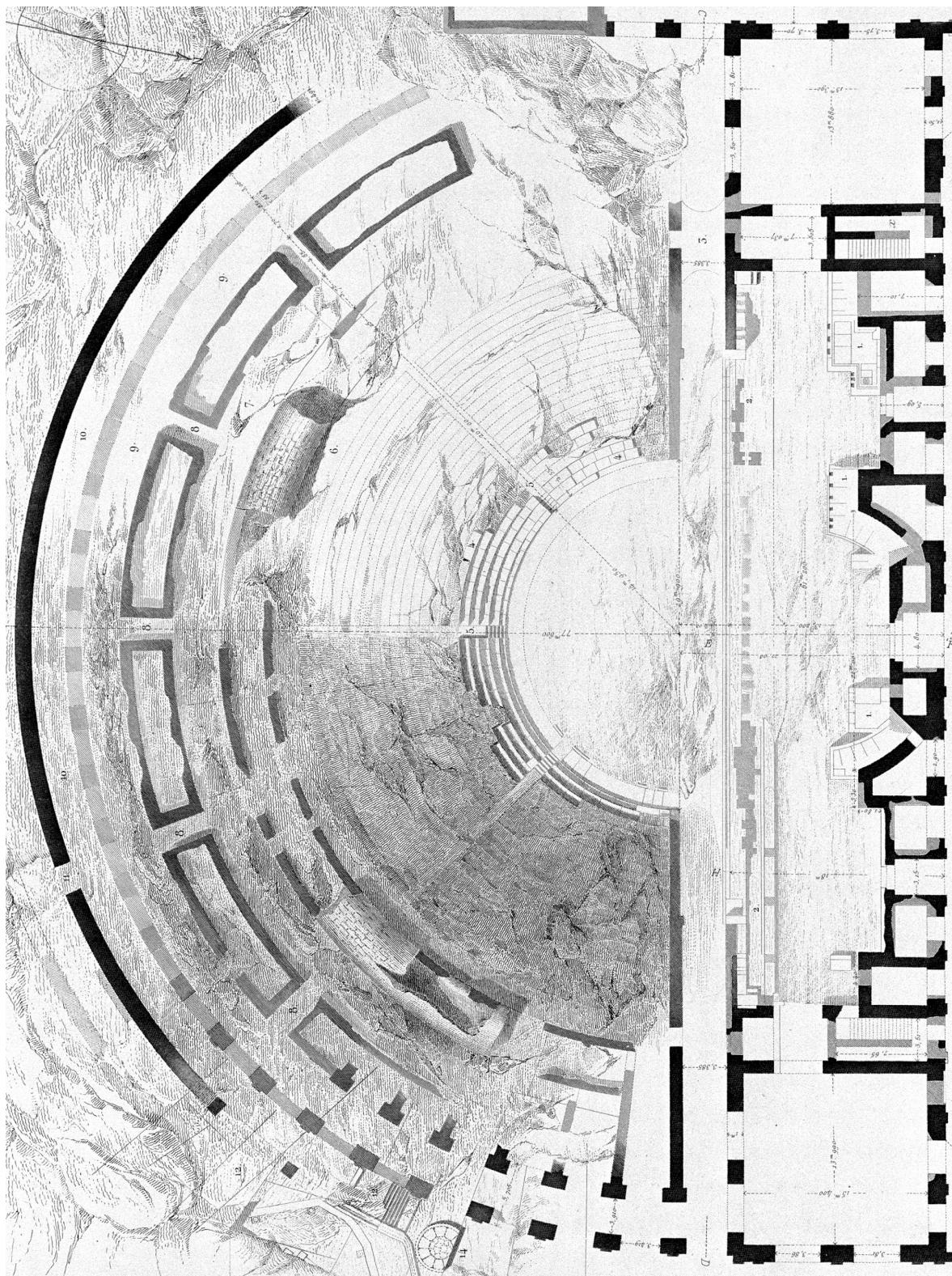


FIGURE A.2 – Représentation de l'état du théâtre d'Orange en 1856 en vue de dessus par A. Caristie².

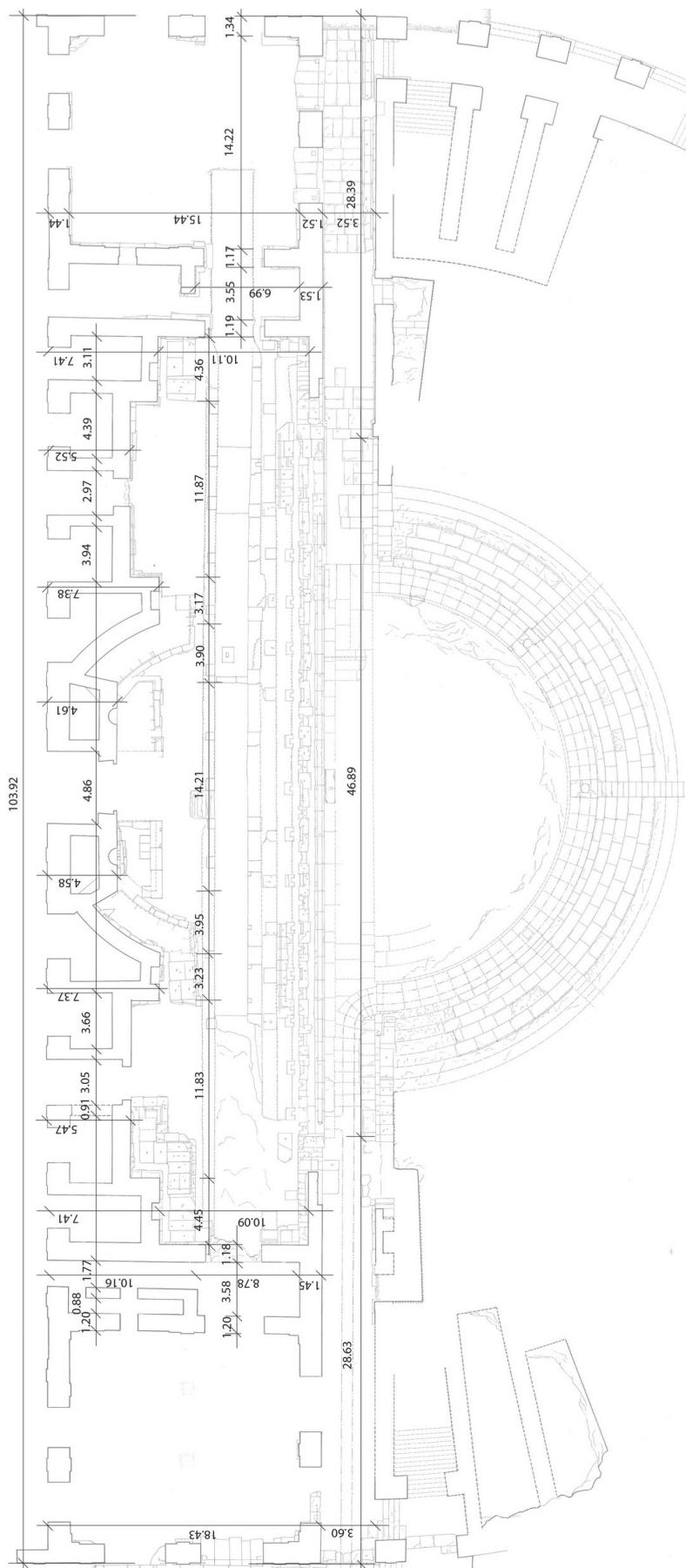


FIGURE A.3 – Plan du rez-de-chaussée au bâtiment de scène³.

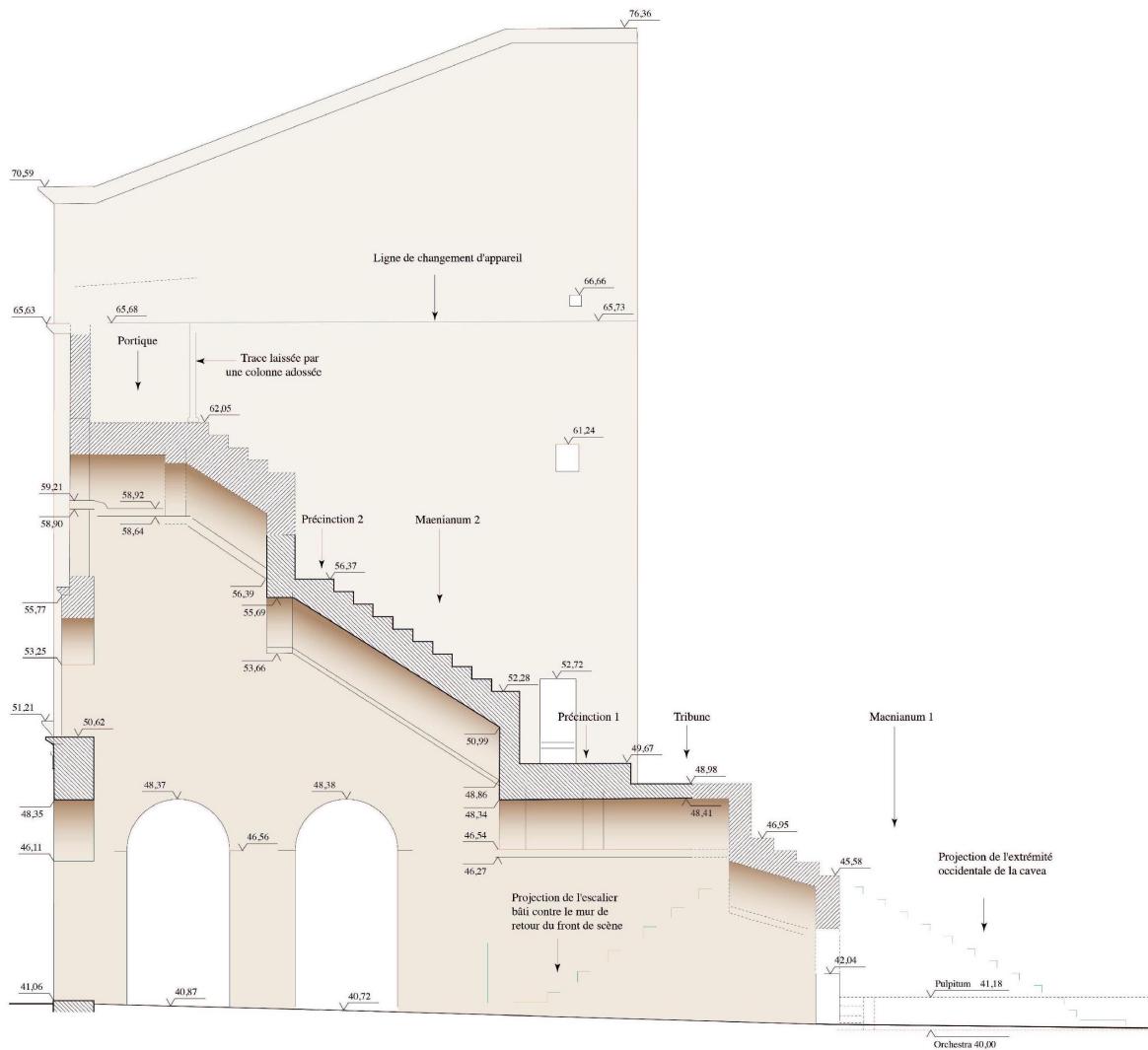


FIGURE A.4 – Coupe sur l'*aditus occidental*⁴.

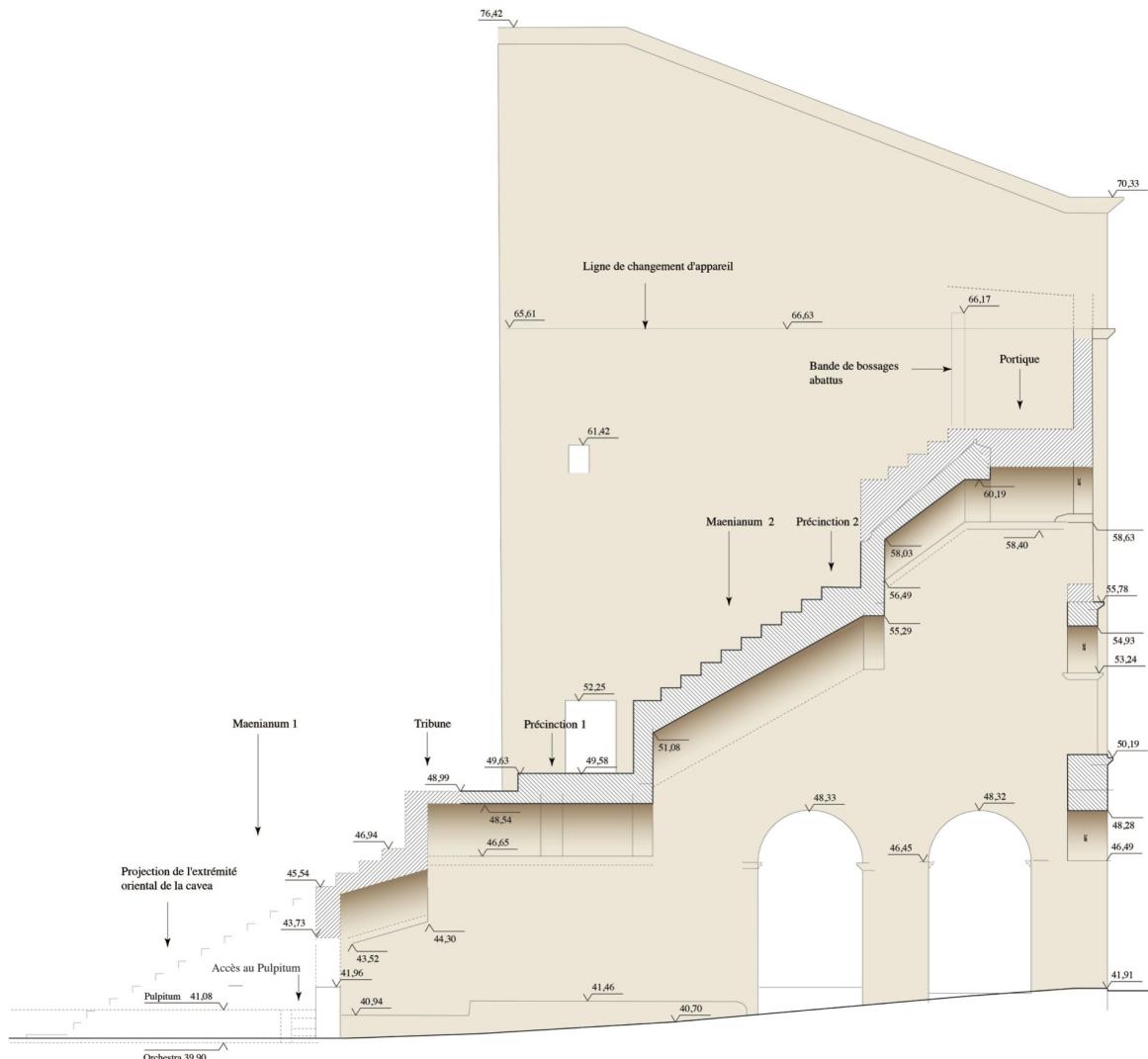


FIGURE A.5 – Coupe sur l'*aditus* oriental⁵.

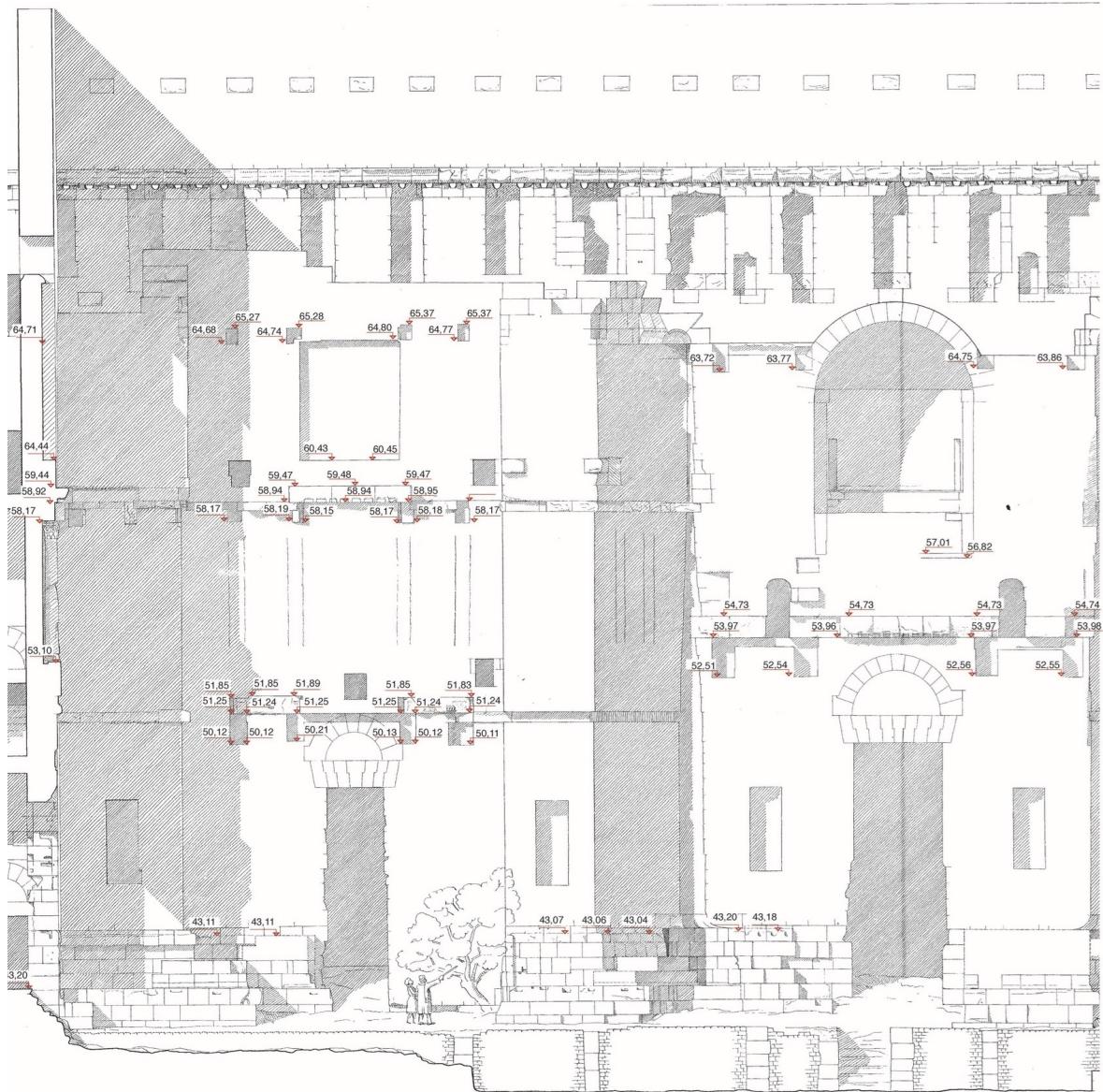


FIGURE A.6 – Elévation de la partie occidentale du front de scène nivé⁶.

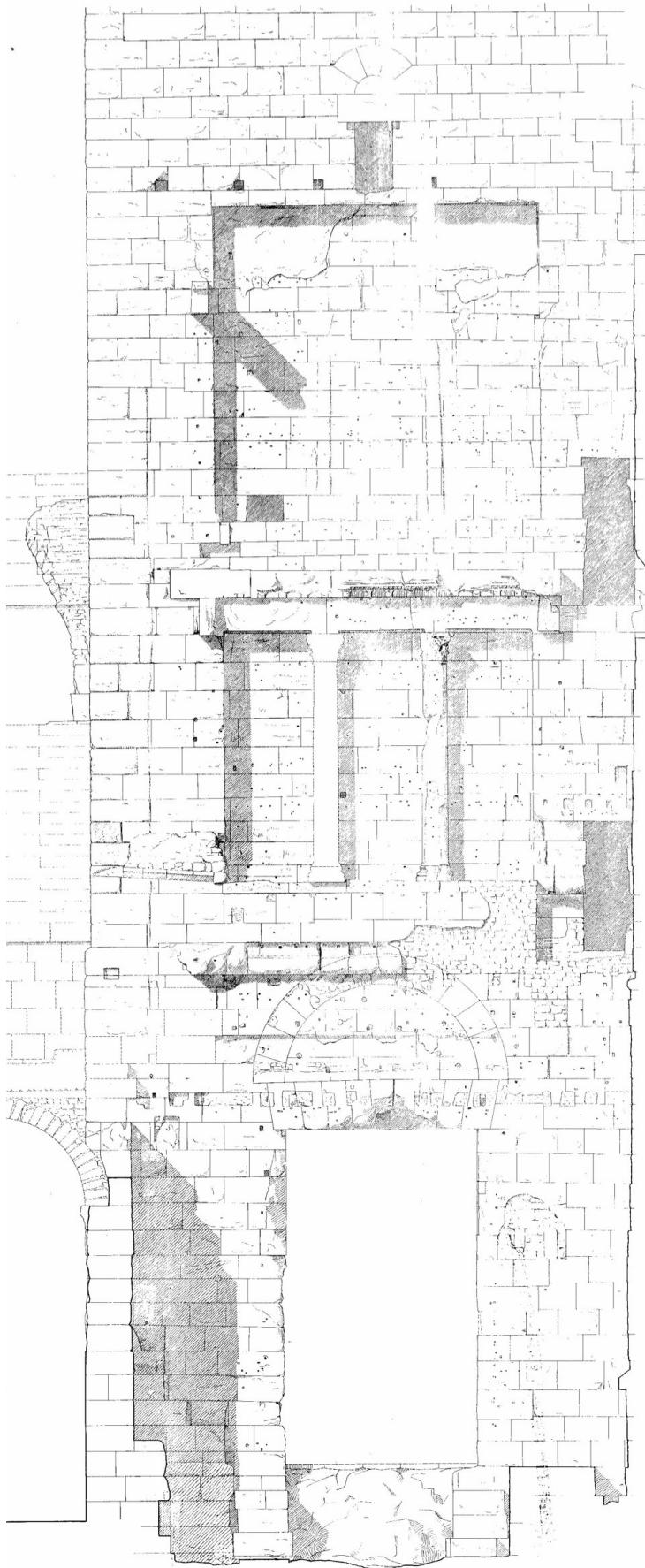


FIGURE A.7 – Élévation du retour occidental du mur de scène⁷.

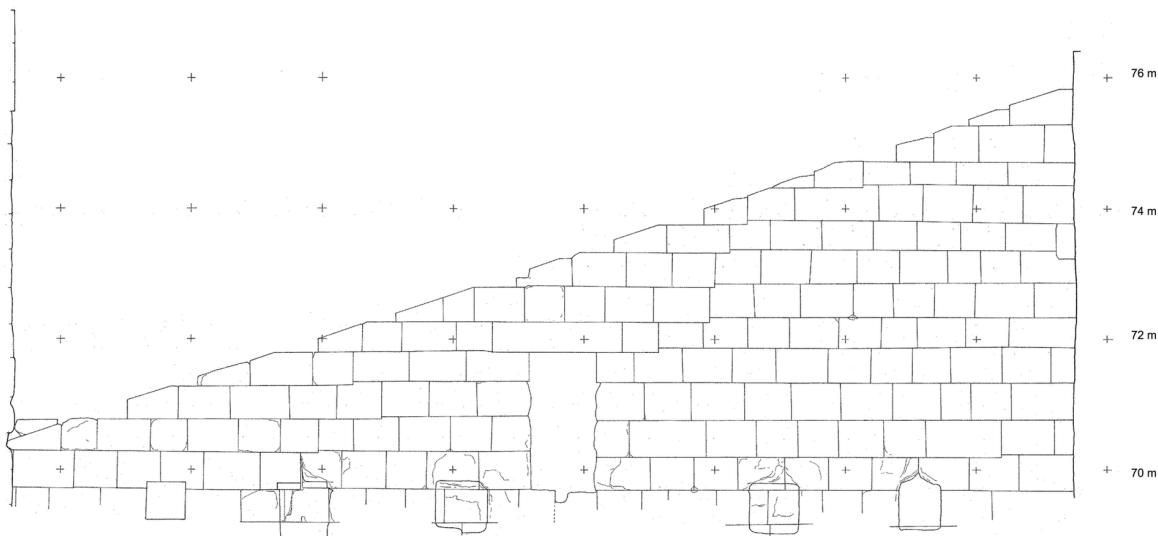


FIGURE A.8 – Elévation de la partie sommitale de la basilique occidentale⁸.

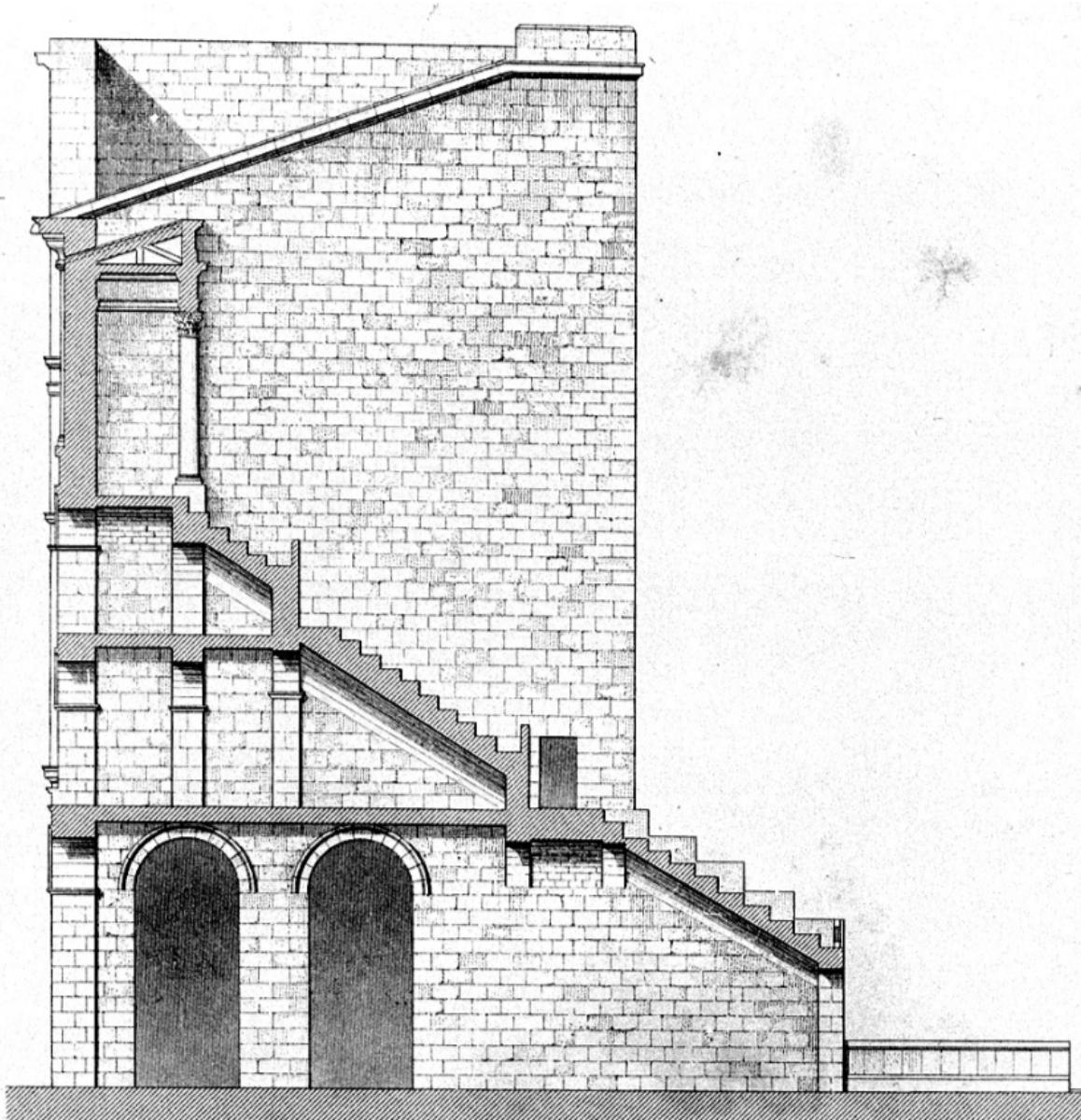


FIGURE A.9 – Coupe de l'*aditus* occidental par A.Caristie - 1856⁹.

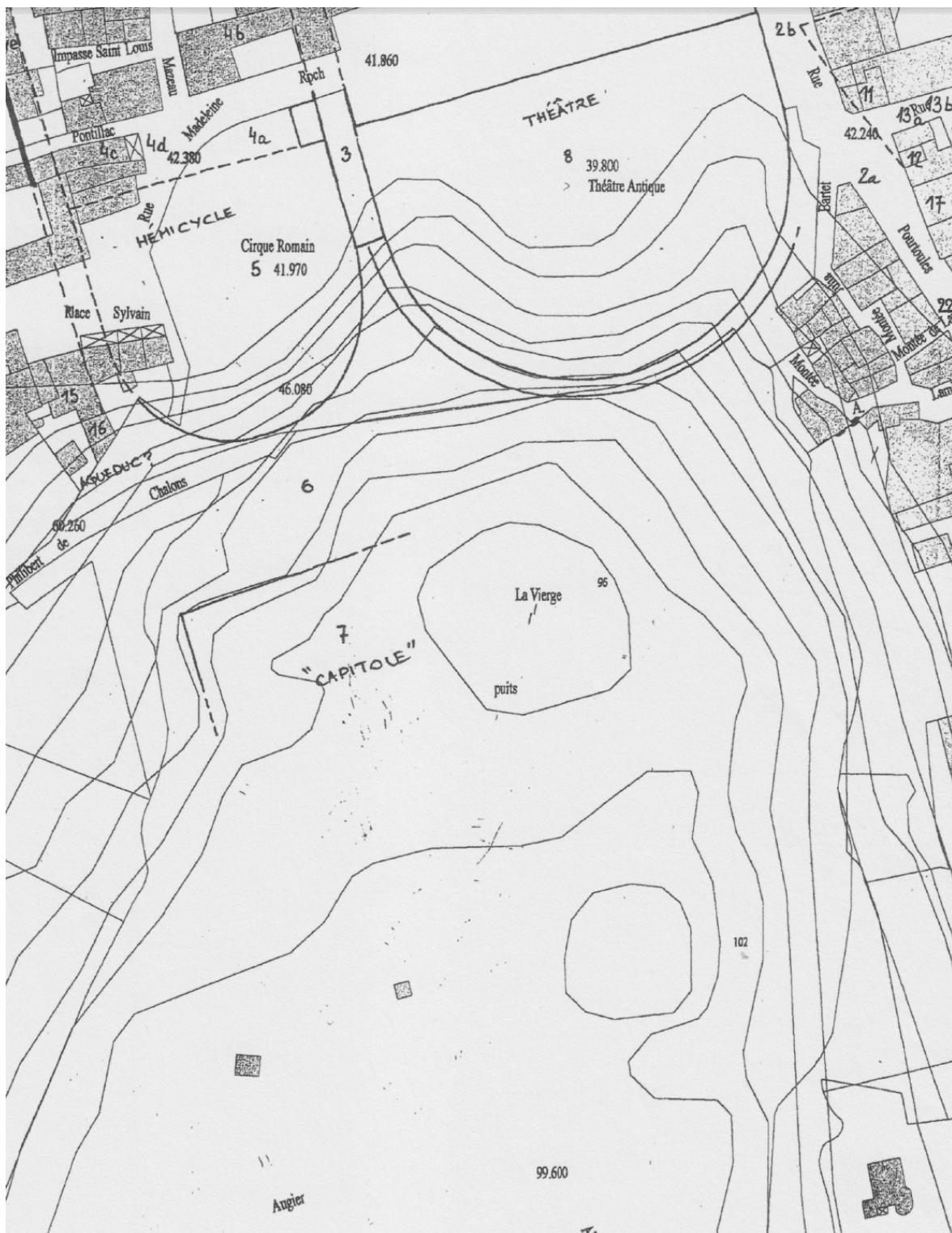


FIGURE A.10 – Plan topographique de la colline Saint-Eutrope¹⁰.

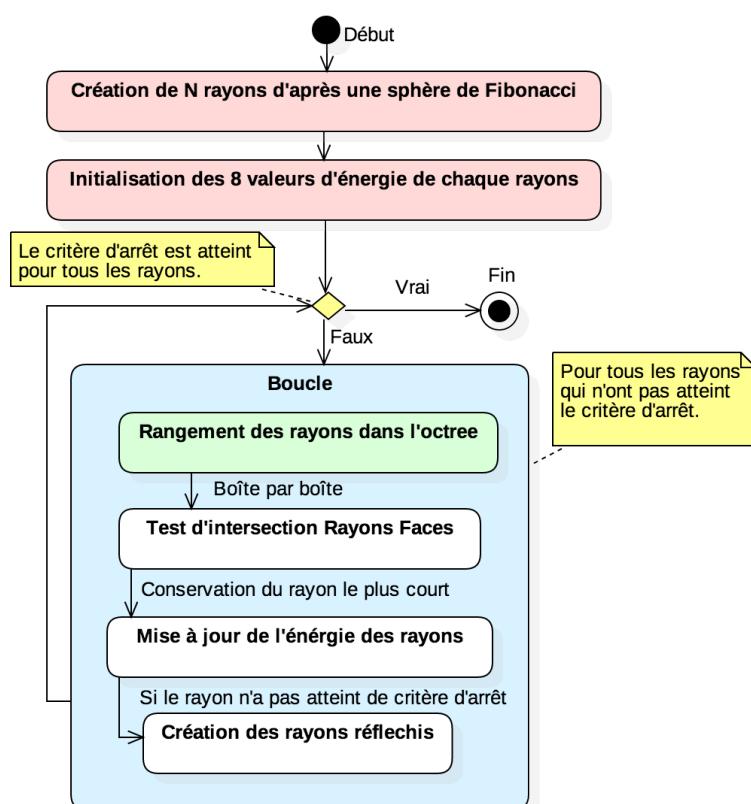


FIGURE A.11 – Diagramme d'activité résumant le processus de création des rayons avec *octree*.

ANNEXE A. ANNEXES

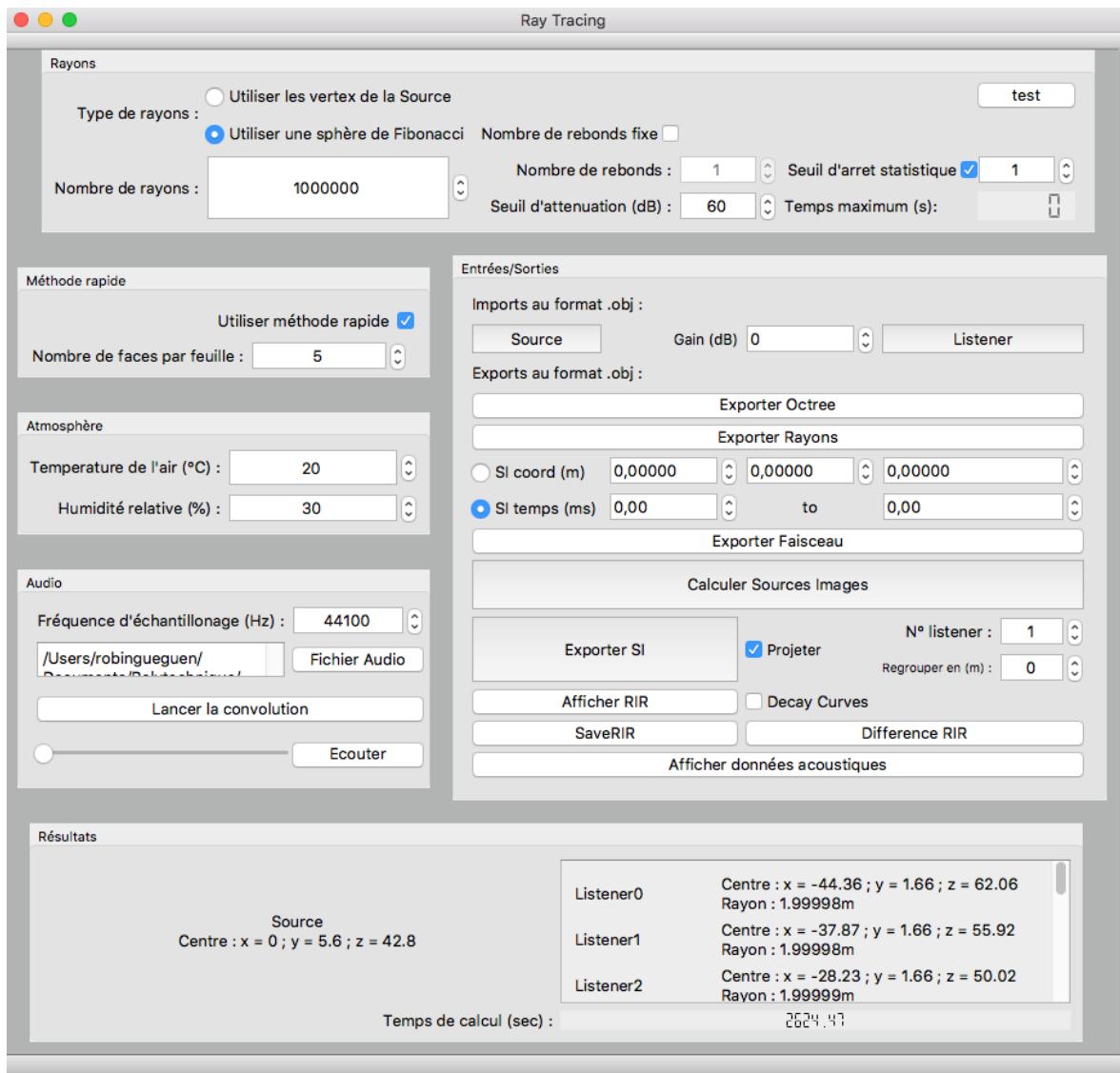


FIGURE A.12 – Interface Homme-Machine (IHM) de l’outil de calcul générée par *Qt Creator*.

A.2 Tableaux annexes

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]	1310	2861	-29	2.98	60.14	81
Réf	[0; -16.5; 43.9]	1501	2966	-32	3.65	58.48	81
2	[0; -28.23; 50.02]	2163	3690	-35	1.11	42.03	129
3	[0; -37.86; 55.92]	2023	4285	-37	0.31	37.48	133
4	[0; -44.36; 62.06]	2439	4335	-37	-0.72	34.69	155
5	[-8.74; -6.12; 41.44]	1539	2788	-28	3.81	62.14	80
6	[-13.51; -9.46; 43.86]	1479	3383	-31	4.78	64.28	79
7	[-23.12; -16.19; 50.02]	2130	3892	-34	3.22	52.99	119
8	[-31.02; -21.72; 55.92]	2342	3916	-37	1.89	52.76	140
9	[-36.34; -25.44; 62.06]	2893	4444	-38	0.17	38.92	177
10	[-28.23; 1.66; 50.02]	2650	4507	-33	-0.32	39.73	168
11	[-37.87; 1.66; 55.92]	3189	3951	-37	-1.24	41.56	205
12	[-44.36; 1.66; 62.06]	3611	4487	-36	-2.66	31.9	256

TABLEAU A.1 – Facteurs perceptifs pour différents récepteurs sur la bande de fréquence de 500Hz pour 1 000 000 de rayons sans le toit.

Références

- 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.

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

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

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

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

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

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, 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

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

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

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 sur 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

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 *parascaenium*. i, 7, 9, 10, 12, 15, 19, 24, 31–34, 36, 44, 144, 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, 146, 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 représentant 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

DIRICHLET Pour une équation aux dérivées partielles, par exemple :

$$\Delta y + y = 0$$

la condition aux limites de Dirichlet sur le domaine $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ 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

1. Manuel *Blender* - Armatures

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 renforcement souvent semi-circulaire ou rectangulaire. 9, 10, 32, 146

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, 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 "VISSER" 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](#), [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](#), [146](#), [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](#), [XVII](#)

PORTICUS IN SUMMA CAVEA Arcade bordée de colonnes située au dessus du troisième *maenianum*. [i](#), [ii](#), [12](#), [17](#), [19](#), [23](#), [27](#), [36](#), [38](#), [43](#), [47](#), [132](#), [141](#), [142](#), [148](#), [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](#)

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](#), [ii](#), [7–9](#), [12](#), [15–17](#), [23](#), [41–45](#), [130](#), [132](#), [141](#), [148](#), [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) suivi 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