

École doctorale n° 386 : Mathématiques Appliquées

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de Sorbonne Université

Spécialité “Mathématiques appliquées”

présentée et soutenue publiquement par

Robin GUEGUEN

le 01 octobre 2018

VIRTUALISATION ARCHITECTURALE VISUELLE ET AUDITIVE DU THÉÂTRE ANTIQUE D'ORANGE

Directeur de thèse : **Pascal FREY**
Co-encadrant de thèse : **Emmanuelle Rosso**

Jury

M. Ilde Fluck,	Professeur	Examineur
M. MC Grobi,	Professeur	Rapporteur
Mme Dominique de Pégomas,	Professeur	Examineur
M. Carton Boy,	Professeur	Examineur

Université Pierre et Marie Curie
Institut des Sciences du Calcul et des Données
4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

Remerciements

Table des matières

Introduction	1
I Modélisation du théâtre d'Orange	3
Introduction	5
1 Architecture générale du théâtre d'Orange	7
1.1 Introduction	8
1.2 Le Postscaenium et les Basiliques	8
1.3 Les aditus, l'Orchestra et la Cavea	8
1.4 Les couvertures et le velum	9
1.5 Exemple minimal	9
1.6 Deuxième paragraphe	10
2 Modélisation	11
2.1 Introduction	12
2.2 Le mur de scène et ses basiliques	12
2.3 Le pulpitum et l'orchestra	13
2.4 La colline Saint-Eutrope	13
2.5 La cavea	13
2.6 Maenianum	13
2.7 Aditus	14
3 Propositions de reconstitution	15
Conclusion	17
Références	19
II Calculs acoustiques	21
Introduction	23
4 Acoustique de salle	25
4.1 Introduction à l'acoustique de salle	26
4.2 Méthodes de calcul acoustique	26
4.3 Méthode couplée	26

5 Logiciel développé	27
5.1 Introduction	28
5.2 Lecture de maillage	28
5.3 Calcul de rayon	28
5.4 Calcul de sources-images	28
5.5 Génération de réponse impulsionnel	28
5.6 Méthode d'octree	28
5.7 Vue d'ensemble	28
6 Validation	29
6.1 Introduction	30
6.2 Comparaison aux cas test	30
6.3 Analyse de complexité	30
Conclusion	31
Références	33
 III Analyse acoustique du théâtre d'Orange	 35
Introduction	37
6.4 Maillage en test	37
6.5 Matériaux	37
7 Résultats	39
7.1 position des spectateurs	40
7.2 Présence de spectateurs	40
7.3 Présence de velum	40
7.4 Forme et matériaux du toit	40
Conclusion	41
Références	43
A Annexes	I
A.1 Figures annexes	I
A.2 Tableaux annexes	I
B Liste des acronymes	III
C Glossaire	V
D Liste des symboles	VII

Liste des figures

1.1	Légende courte pour la figure	10
2.1	Le repose pied et le premier gradin du premier cuneus : vu de l'extrémité nord avec au premier plan, le mur bordant l'aditus est	14
2.2	Modélisation des maenianum et de l'emprunte des escaliers à retirer apres application des modifiers Array et Screw	14

Liste des tableaux

1.1	Légende courte pour l'exemple de tableau	9
-----	--	---

Introduction

La pluridisciplinarité consiste à aborder un objet d'étude selon les différents points de vue de regards spécialisés. Il s'agit de juxtaposer le travail de plusieurs disciplines autour d'un même objet d'étude. L'objectif de la pluridisciplinarité est ainsi d'utiliser la complémentarité intrinsèque des disciplines pour la résolution d'un problème. 2018 marque l'année de fusion entre l'[Université Pierre et Marie Curie \(UPMC\)](#) et Paris-Sorbonne développant ainsi la transversalité et la collaboration entre de nombreux domaines scientifiques et littéraires. C'est pourquoi ce projet de thèse s'inscrit dans une démarche pluridisciplinaire en sollicitant les sciences mathématiques pour l'étude de problématiques archéologiques.

En 2014, dans le cadre du projet NUMERO, les équipes d'archéologues de la Sorbonne et du [CNRS](#) s'associent à l'[Institut des sciences du calcul et des données \(ISCD\)](#) de l'[UPMC](#) afin de virtualiser des fragments de décoration retrouvés dans les décombres du théâtre antique d'Orange. Cette collaboration a permis la numérisation de blocs issus de la frise du cortège dionysiaque ornant autrefois la façade du mur de scène et de pouvoir par la suite les rassembler virtuellement façon puzzle à l'aide d'un logiciel spécialement développé. "Il s'agit à terme, non seulement de restituer l'histoire du front de scène du théâtre et de comprendre les finalités de ses concepteurs, mais de fournir un corpus de référence pour l'ornementation architecturale en Narbonnaise" [?].

Cette démarche a naturellement ouvert la voie à une étude plus large du théâtre d'Orange. L'objectif de cette thèse est ainsi de virtualiser le théâtre dans son ensemble afin de pouvoir en étudier l'architecture et les hypothèses de reconstitution de son état d'origine. Pour compléter cette démarche purement visuelle, l'équipe projet s'associe au [Centre de mathématiques appliquées de l'école Polytechnique \(CMAP\)](#) pour étudier le comportement acoustique du théâtre. Comment virtualiser un monument d'une corpulence telle que celle du théâtre d'Orange (103 m de large pour 37 m de haut)? Comment remonter le temps pour restituer son architecture originel malgré les multiples transformations qu'il a subit durant des siècles? Comment en faire un outil numérique exploitable pour des études scientifiques divers? Quelles sont les solutions et les contraintes d'études acoustiques une tel lieu? Quelles hypothèses archéologiques peut-on analyser par le biais d'une étude acoustique? Comment diffuse-t-on des résultats pluridisciplinaire? Voici la liste non-exhaustive des problématiques soulevées par un projet comme celui traité dans ce manuscrit de thèse.

Première partie

Modélisation du théâtre d'Orange

Introduction

Le théâtre antique d'Orange situé dans le Vaucluse est le théâtre romain le mieux conservé d'Europe et un des trois seul au monde à avoir conservé son mur de scène. Il est adossé à la colline Saint-Eutrope sur laquelle sa [Cavea](#) repose partiellement.

En 45 avant notre ère, suite à la victoire de César sur la Gaule, de larges vagues de colonisation amenèrent des soldats vétérans à s'installer dans la province de Gaule trans-alpine qu'August réorganise par la suite en province de Narbonnaise. L'architecture urbaine est alors régie par les écrits de [VITRUVÉ \[-15\]](#) et de nombreux théâtres sont construits comme celui d'Arles en 20 avant notre ère. La construction du théâtre de la "Colonia Firmus Iulius Secundanorum Aurosio" (l'ancienne ville d'Orange) fut démarrée par les vétérans de la II^e légion gallique de César vers 10 avant notre ère et dura près de quelques dizaines d'années. [[BADIE et collab., 2007](#)]

Lorsque le théâtre fut abandonné comme édifice de spectacle, il ne fut pas détruit. Les princes d'Orange y firent installer un poste avancé de leur château et l'ensemble de l'édifice fut investi par des habitations utilisant le mur de scène comme rempart de protection. Au XVII^e siècle le roi Louis XIV qualifiait en ces mots son impressionnant mur de scène de 103m de large par 37m de haut comme : « La plus belle muraille de mon royaume » et quelques écrivains tentèrent d'imaginer les démonstrations qui pouvaient se tenir dans ce lieu de spectacle.

Ce n'est pourtant qu'au XIX^e siècle que débuta un vaste chantier de déblaiement de l'enceinte dans le but de restituer au bâtiment son rôle premier. Avec ce projet apparurent les premières images d'archive du théâtre. En charge du chantier, Augustin Caristie fait paraître en 1846, *"Monuments antiques à Orange, arc triomphe et théâtre"* oeuvre de référence qui recense l'état des vestiges avant et après la destruction des maisons. Ces textes et dessins bien que, comme le stipule l'auteur, parfois hypothétiques sont par la suite complétés par d'autres architectes comme Pierre-Honoré Daumet qui réalisa en 1873 le relevé des élévations du monument. Les premières représentations théâtrales modernes purent alors avoir lieu. À la fin du siècle l'architecte Jean-Camille Formigé fut chargé de restaurer la cavea selon les indications de Caristie et en s'inspirant du modèle de Vitruve. Son fils Jules Formigé poursuivit son travail et mis à jour de nombreux éléments de décors notamment en creusant au niveau de l'[hyposcaenium](#). Depuis les années 20 jusqu'aux années 80 de nombreuses reconstructions ont été effectuées avec une rigueur archéologique contestable dans le but principalement d'habiller le lieu plus que pour le restituer. En 1981 le théâtre entre au patrimoine mondial de l'UNESCO et quelques années plus tard d'autres constructions modernes tels que la couverture métallique de la scène viennent s'ajouter, détériorant au passage une partie de la maçonnerie antique. Certains projets ont pu être stoppés avant que des dégâts irréparables ne soient créés comme la création d'ascenseurs dans le mur de scène. Malgré tout, ces travaux ont souvent été entrepris sans le moindre regard archéologique et de nombreuses données ont été perdues [[ROUMÉGOUS et PROVOST, 2009](#)].

Depuis la fin du XX^e siècle l'[Institut de recherche sur l'architecture antique \(IRAA\)](#) a

relancé une étude approfondie du bâtiment et de sa décoration avec une approche archéologique rigoureuse. C'est dans cette démarche que cette thèse s'interface avec pour objectif la modélisation numérique du théâtre. Dans cette première partie nous allons donc présenter l'agencement architectural du bâtiment sans entrer dans les détails de sa décoration. Nous détaillerons ensuite les méthodes de modélisation graphique utilisées et finirons par exposer les nouveaux éléments archéologiques découlant de ce travail.

Chapitre 1

Architecture générale du théâtre d'Orange

« L'architecture, c'est ce qui fait les belles ruines »

Auguste Perret

Sommaire

1.1 Introduction	8
1.2 Le Postscaenium et les Basiliques	8
1.3 Les aditus, l'Orchestra et la Cavea	8
1.4 Les couvertures et le velum	9
1.5 Exemple minimal	9
1.5.1 Exemple Tableaux et figures	9
1.5.2 Exemple Symboles mathématiques	9
1.6 Deuxième paragraphe	10

1.1 Introduction

En 2013, l'IRAA lance une série de campagnes de mesure et d'analyse du théâtre d'Orange d'une part grâce à des relevés effectués sur le terrain et d'autre part à l'aide d'une étude approfondie des documents d'archive conservée pour la plupart à la Médiathèque de l'architecture et du patrimoine à Charenton-le-Pont. Celles-ci comportent les plans de Caristie et Daumet et permettent d'avoir une vision du théâtre avant que celui-ci ne soit restauré par Formigé. L'étude réalisée durant cette thèse est donc principalement basée sur le rapport de l'IRAA résultant de ces travaux d'analyse : BADIE et collab. [2013b] et [BADIE et collab., 2013a].

Le théâtre d'Orange a été bâtie en partie selon les indications de VITRUVÉ [-15] et suit donc les préceptes de l'architecture romaine de l'époque impériale. Comme la plupart de ces édifices, il se présente en demi-cercle fermé par un mur rectiligne. Sa Cavea tournée vers le Nord est adossée à la colline Saint-Eutrope offrant ainsi un support naturel à l'édifice. A la différence des odéons seul un velum servait de toiture aux spectateurs.

1.2 Le Postscaenium et les Basiliques

Le Postscaenium (ou mur de scène) constituant la façade nord du bâtiment ainsi que les deux Basiliques l'enclavant constituent les parties les mieux conservées du théâtre. Le Postscaenium servait de décor pour les représentations et tenait probablement un rôle acoustique également (voir partie 'Analyse acoustique du théâtre d'Orange' on page 37). Les côtés est et ouest donnaient sur des rues, alors qu'adossé au mur nord se trouvait un Porticus post scaenam servant de galerie commerçante. Celui-ci se trouvant à l'extérieur du théâtre ne fait pas partie de l'étude. Il donne néanmoins accès au Postscaenium par le biais de dix-sept portes réparties de manière symétrique par rapport à la porte centrale. Le mur de façade du bâtiment de scène est flanqué de part et d'autre de deux Basiliques de forme carrée auxquelles on accède depuis la scène par une grande porte rectangulaire et un Parascaenium. Les Basiliques servaient à entreposer des décors volumineux et permettaient l'entrée des artistes. Elles donnaient également accès à l'extérieur par deux portes voutées ou aux aditus par deux autres portes voutées.

1.3 Les aditus, l'Orchestra et la Cavea

L'orchestra est actuellement limitée d'une part par le front du plateau scénique et de l'autre par un passage dallé semi-circulaire, qui couvre un caniveau. En bordure interne de ce dallage, qui est presque entièrement moderne, apparaissent les maigres vestiges d'un balteus. De l'extérieur du théâtre, l'aire est accessible par deux larges passages rectilignes, les aditus. Chacune est partiellement couverte de la succession de trois voûtes en décrochement — deux inclinées et une horizontale — qui portaient les tribunes et les extrémités de la cavea.

La cavea, telle qu'elle a été restaurée, comprend trois maenianums, chacun séparé de son conjoint par un podium. Le premier maenianum, ou ima cavea, comprend un repose-pied à sa base et vingt gradins séparés par des escaliers en quatre cuneus. Ils sont couronnés par une profonde précinction sur laquelle donnent neuf ouvertures d'un couloir souterrain aux extrémités duquel conduisent deux escaliers radiaux prenant naissance au rez-de-chaussée du monument. Le couloir ouvre aussi sur dix-huit pièces aveugles, construites ou aménagées dans des grottes naturelles. Deux autres escaliers installés sous

les gradins conduisaient à mi-hauteur du maenianum, à partir des parodos. Ils n'ont pas été remis en fonction. Le deuxième maenianum, ou *media cavea*, repose, dans sa partie inférieure, sur le couloir souterrain qui dessert le premier maenianum et, dans sa partie supérieure, sur de la terre ou du remblai que complète, à proximité des aditus, deux niveaux de chambres voûtées. Il comporte, entre deux circulations horizontales peu profondes, neuf gradins divisés en huit *cuneus* par neuf escaliers. On accède à son niveau supérieur par une série de passages radiaux reliés à un second couloir annulaire, dont la paroi extérieure s'identifie au mur périphérique du théâtre. Cinq de ces passages, qui devaient être neuf dans l'Antiquité, sont aujourd'hui utilisables. Le couloir est souterrain dans la zone où la *cavea* est adossée et construit sur deux niveaux de chambres voûtées dans sa partie la plus orientale. Il est directement accessible de l'extérieur par une porte à l'est et une autre à l'ouest. Le troisième maenianum, ou *summa cavea*, est entièrement construit sur structure creuse. Il comporte cinq gradins à l'origine divisés par neuf escaliers. Il est couronné par une plate-forme aménagée au-dessus du second couloir annulaire. Celle-ci était jadis occupée par un portique, une *porticus in summa cavea*, dont la reconstruction partielle de deux colonnes évoque la présence. Dans sa partie centrale, le mur périphérique de la *cavea* est percé de portes donnant accès au portique et à la *summa cavea* à partir du chemin qui borde l'édifice à sa périphérie. Les portes sont axées sur les escaliers de la *cavea*.

1.4 Les couvertures et le velum

1.5 Exemple minimal

1.5.1 Exemple Tableaux et figures

On va ici placer des éléments graphiques (voir tableau 1.1 et figure 1.1), juste pour avoir des entrées dans les listes des figures et des tableaux. On remarquera l'utilisation des sous-figures 1.1a et 1.1b.

TABLEAU 1.1 – Un tableau avec une légende tellement longue que ce serait hideux dans la liste des tableaux

Coucou	Au revoir
maman	papa

1.5.2 Exemple Symboles mathématiques

Rien de spécial à propos des math, hormis l'illustration des symboles listés en fin de document, tels α ou γ , qui peuvent être utilisés indifféremment en mode *in-line* ou dans des équations¹ :

$$\alpha = \gamma/2 \tag{1.1}$$

Les entrées des glossaires peuvent même être appelés dans des figures (PDF avec surcouche \LaTeX , ou *TikZ*).

1. Le lecteur notera que `hyperref` ajoute un lien cliquable sur chaque entrée des différents glossaires.



(a) Photo du Cap d'Antibes



(b) Saint Jeannet, depuis son Baou

FIGURE 1.1 – Exemple d'utilisation des sous-figures. J'utilise ici volontairement une légende longue.

1.6 Deuxième paragraphe

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Chapitre 2

Modélisation

« Les détails font la perfection et la perfection n'est pas un détail »

Léonard de Vinci

Sommaire

2.1	Introduction	12
2.2	Le mur de scène et ses basiliques	12
2.3	Le pulpitum et l'orchestra	13
2.4	La colline Saint-Eutrope	13
2.5	La cavea	13
2.6	Maenianum	13
2.7	Aditus	14

2.1 Introduction

Pour pouvoir étudier un monument dans ces moindres détails de nombreux chercheurs s'orientent aujourd'hui vers la modélisation 3D. Effectivement, jusqu'à présent les scientifiques menaient leurs études à l'aide de plans ou de dessins en 2D ou bien de maquette à échelle réduite. Mais les outils numériques disponibles aujourd'hui comportent de nombreux avantages par rapport à ces anciennes techniques. Tout d'abord, il est possible d'obtenir les mêmes informations qu'avec les "anciennes techniques" en terme de côtes, formes, aspect. Mais en plus, à partir d'un modèle numérique unique, on peut sélectionner les informations que l'on souhaite étudier tout simplement en changeant les objets à afficher, les vues ou les modes d'affichage. On peut par exemple afficher un monument par vu du dessus avec ses cotes et étudier le plan 2D correspondant. Mais on peut également réaliser une impression 3D pour en avoir une maquette à l'échelle réduite. Un seul outil permet donc d'obtenir l'ensemble des informations que l'on souhaitait acquérir par le passé. Un modèle numérique 3D peut par ailleurs être utilisé par des logiciels de calcul ou de simulation afin de tester des hypothèses physiques (écoulement de fluide, acoustique, ...) ou architecturale (portance, agencement de décor, ...). Il permet également de réaliser des animations (déplacement de personnages, ouverture de haut-vents, ...) ou des visites immersives grâce aux technologies de réalité virtuelle.

Il existe bien entendu de nombreuses limites à la numérisation 3D car cette technique est relativement récente et beaucoup de développement sont en cours. La principale contrainte est la puissance de calcul des ordinateurs et leur espace de stockage qui doivent prendre en charge de très grandes quantités de données.

Pour virtualiser des monuments, il y a deux techniques principalement utilisées. La première consiste à réaliser un nuage de point à l'aide d'appareils de mesure (laser, appareils photo, ...) à la manière d'un scanner. Prenons l'exemple de la photogrammétrie qui est aujourd'hui largement répandue dans la restitution numérique de monument. Il s'agit de photographier l'ensemble du bâtiment sous tous ses angles en s'assurant que chaque photo a une partie commune avec une autre. Les logiciels de traitement peuvent alors corréliser les photos les unes avec les autres et recréer l'image en trois dimensions. Cependant, la limite de cette technique est que plus la précision est grande, plus le volume de donnée à traiter est conséquent et rend les calculs difficiles. C'est pourquoi nous avons utilisé la deuxième méthode dite de CAO (conception assistée par Ordinateur). Il s'agit de retranscrire par des formes géométriques 3D plus ou moins complexes le monuments.

2.2 Le mur de scène et ses basiliques

Le mur de scène ainsi que ses deux basiliques constituent un bloc distinct. Le contour extérieur est créé grâce aux cotes de la planche XXI ? . Ce bloc est disposé dans le repère absolu d'après les cotes indiquées sur le plan nord-sud par rapport au centre de révolution de la cavea. Sur le plan est-ouest, le mur de scène extérieur (la plus grande longueur) est centré en 0, les extrémités de chacune des basiliques sont donc à 51,96m du centre.

Sont ensuite créées des objets représentant les pièces. A l'aide d'un modifier Boolean ces objets sont soustraits à la forme de base. La même méthode est utilisée pour le haut du mur qui supporte le toit (fig 24 ? , pour les ouvertures sur le front de scène (planche XXIX ?), et pour les portes (planche XXI ?). Pour l'encastrement des poutres dans la partie sommitale du mur nous utilisons des poutres rectangulaire et identique car les traces décrites sur la planche XXXVII ? sont difficiles à interprétation. Cet élément pourra être

corrigé par les archéologues dans une prochaine étape.

2.3 Le pulpitum et l'orchestra

Le pulpitum, autrement dit l'estrade de scène a complètement disparu et a aujourd'hui été remplacé par un plancher moderne. Il reste néanmoins des traces sur le mur de scène qui permettent de le modéliser dans sa version antique. Les planches XLVII et XLIX ? donnent les élévations du pulpitum ainsi que de l'orchestre sur les extrémités orientales et occidentales. L'orchestre est une forme volumique dont la face supérieure représente le sol. Il sera dans une prochaine étape creusé à l'aide de modifieurs Boolean pour l'hypocaustum et le caniveau décrit dans une autre partie.

2.4 La colline Saint-Eutrope

Comme souvent les architectes de l'époque ont adossé la cavea sur un relief naturel afin de solidifier la structure et de simplifier la construction de l'édifice. La colline Saint-Eutrope qui soutient donc le théâtre sur sa partie méridionale a été modélisée d'après les lignes d'altitude (référencées page 11 ?) à partir de la plus basse jusqu'à la plus haute par pas de 6m par extrusion successive. Les élévations ont ensuite été légèrement adaptées (ligne par ligne) pour s'encastrent au mieux dans le théâtre. La colline est donc actuellement peu précise et il est nécessaire de l'affiner à l'aide d'un document détaillant mieux sa géométrie.

2.5 La cavea

La cavea est la partie semi-circulaire adossée à la colline qui soutient les maenianum (gradins). Elle comporte des ambulacres qui permettent aux spectateurs d'atteindre leur siège par le biais de vomitorium et s'ouvre sur les rues extérieures par trois étages d'arcades. La modélisation se fait à partir de la planche LX ? en plaçant la bordure extérieure au même niveau que la bordure des basiliques (c'est à dire à 51,96m du centre). Une fois le plan de coupe réalisé on utilise un modifieur Screw pour faire une extrusion circulaire autour du centre. On comprend alors que les cotes de l'ensemble de la cavea sont celles de la coupe théorique. Sur cette planche certaines valeurs sont incohérentes et on utilise donc la règle décrite en introduction de cette partie pour choisir les bonnes valeurs. Le troisième maenianum n'étant pas soutenu par la colline, il repose sur des caissons voûtés qui sont modélisés séparément.

Les arcades donnant sur l'extérieur sont répétées à l'aide d'un modifieur Array puis soustraites à la cavea par un modifieur Boolean. A noter que le modifieur Screw doit être appliqué pour que le Boolean fonctionne.

2.6 Maenianum

Les Maenianum sont modélisés à partir d'un plan de coupe d'un bloc formant un gradin auquel est appliqué un modifieur Array (dupliquant du nombre de gradins) et d'un modifieur Screw pour faire une extrusion de révolution. Le plan de base est un quasi-triangle représentant le profil d'un bloc rectangulaire coupé en deux. Il n'est pas coupé le long de la diagonale car une partie plate d'une dizaine de centimètres permet de faire reposer les

bloc les uns sur les autres. Cette forme est issue du document ? où l'on retrouve "le seul gradin antique dont une face de joint est actuellement visible" figure 2.1. C'est cette forme qui est ajustée pour coïncider avec les cotes de la cavea. Une fois les modifiers appliqués, on peut utiliser un nouveau modifier Boolean pour les marches d'escalier et les vomitorium. Les empreintes des escaliers qui seront retirés aux maenianum sont en fait la forme de base du maenianum retourné et placé de sorte que le coin supérieur (le bord du gradin) se retrouve au centre de la partie visible du gradin. Cela permet de retirer exactement la moitié de la hauteur et de la profondeur du gradin. La forme 2D de l'escalier est ensuite dupliquée avec le modifier Array et extrudée avec un modifier Solidify sur 1,2m. Cette valeur est prise arbitrairement par rapport aux plans non cotés du document ? et devra être affinée par les experts.



FIGURE 2.1 – Le repose pied et le premier gradin du premier cuneus : vu de l'extrémité nord avec au premier plan, le mur bordant l'aditus est

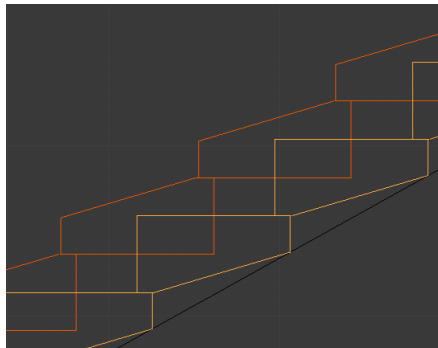


FIGURE 2.2 – Modélisation des maenianum et de l'emprunte des escaliers à retirer après application des modifiers Array et Screw

2.7 Aditus

Chapitre 3

Propositions de reconstitution

« The thing about quotes on the internet is that you can not confirm their validity »

Abraham Lincoln

Conclusion

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. [8](#)
- 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. [8](#)
- BADIE, A., J.-C. MORETTI et D. TARDY. 2007, «Pouvoir du théâtre et théâtre du pouvoir. nouvelles recherches sur le théâtre d'orange», *Archéopages*. [5](#)
- ROUMÉGOUS, A. et M. PROVOST. 2009, *CARTE ARCHEOLOGIQUE DE LA GAULE*, Académie des Inscriptions et Belles-Lettres Ministère de l'Education Nationale, Ministère de la Recherche Ministère de la Culture et de la Communication Académie des Inscriptions et Belles-Lettres Ministère de l'Education Nationale, Ministère de la Recherche Ministère de la Culture et de la Communication. [5](#)
- VITRUVÉ. -15, *De Architectura*, vol. V. [5](#), [8](#)

Deuxième partie

Calculs acoustiques

Introduction

Chapitre 4

Acoustique de salle

*« Et c'est là que jadis, à quinze ans
révolus
A l'âge où s'amuser tout seul ne
suffit plus
Je connus la prime amourette
Auprès d'une sirène, une
femme-poisson
Je reçus de l'amour la première
leçon
Avalai la première arête »*

Georges Brassens

4.1 Introduction à l'acoustique de salle

Livre de Jouhaneau

4.2 Méthodes de calcul acoustique

4.2.1 FEM/BEM

4.2.2 RayTracing

4.2.3 Sources-image

4.2.4 Statistique

4.3 Méthode couplée

Chapitre 5

Logiciel développé

« *Sucette à la viande* »

MC Grobi

5.1 Introduction

Rappel des problématiques, conditions choisies (source omni, parois non diffusante)

5.2 Lecture de maillage

5.3 Calcul de rayon

5.4 Calcul de sources-images

5.5 Génération de réponse impulsionnel

5.6 Méthode d'octree

5.7 Vue d'ensemble

Add-on blender, traitement du signal, etc

Chapitre 6

Validation

« *Areuh* »

Ilde Flucki

6.1 Introduction

Rappel cahier des charges

6.2 Comparaison aux cas test

6.2.1 Salle rectangulaire

6.2.2 Salle sphérique

6.3 Analyse de complexité

Conclusion

Références

Troisième partie

Analyse acoustique du théâtre d'Orange

Introduction

6.4 Maillage en test

6.5 Matériaux

Chapitre 7

Résultats

*« Et c'est là que jadis, à quinze ans
révolus
A l'âge où s'amuser tout seul ne
suffit plus
Je connus la prime amourette
Auprès d'une sirène, une
femme-poisson
Je reçus de l'amour la première
leçon
Avalai la première arête »*

Georges Brassens

Sommaire

4.1	Introduction à l'acoustique de salle	26
4.2	Méthodes de calcul acoustique	26
4.2.1	FEM/BEM	26
4.2.2	RayTracing	26
4.2.3	Sources-image	26
4.2.4	Statistique	26
4.3	Méthode couplée	26

7.1 position des spectateurs

7.1.1 Devant

7.1.2 Derrière

7.1.3 Jardin

7.1.4 Cours

7.2 Présence de spectateurs

7.3 Présence de velum

7.4 Forme et matériaux du toit

Conclusion

Références

Annexe A

Annexes

A.1 Figures annexes

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper. On rappelle que α et γ sont liés par la relation (1.1). Pour plus de détails, voir page 9.

A.2 Tableaux annexes

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Annexe B

Liste des acronymes

CMAF Centre de mathématiques appliquées de l'école Polytechnique. [1](#)

CNRS Centre national de recherche scientifique. [1](#)

IRAA Institut de recherche sur l'architecture antique. [5](#), [8](#)

ISCD Institut des sciences du calcul et des données. [1](#), [8](#)

UPMC Université Pierre et Marie Curie. [1](#)

Annexe C

Glossaire

Cavea Désigne l'ensemble des rangées concentriques composant les gradins. [5](#)

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

Maenianum Portions de la cavea séparées par un [Podium](#) et rassemblant un ensemble de gradins. [V](#), [VI](#)

modifier "Array" 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 modifier à un objet vide (empty) qui aura subi une rotation. Cela est utilisé par exemple pour répéter les colonnes du Porticus in Summa Cavea.. [8](#)

modifier "Boolean" 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.. [8](#)

Orchestra Espace semi-circulaire (chez les romains) ou circulaire (chez les Grecs) se situant entre la scène et le premier gradin. [V](#)

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

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

Annexe D

Liste des symboles

α Angle de d'attaque de la molette. [8](#), [9](#), [I](#)

γ Angle de dépouille de la molette. [8](#), [9](#), [I](#)