

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	Examinateur
M. MC Grobi,	Professeur	Rapporteur
Mme Dominique de Pégomas,	Professeur	Examinateur
M. Carton Boy,	Professeur	Examinateur

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

T
H
E
S
E

Préface de l'auteur

Cher lecteur,

avant de parcourir ce manuscrit, fruit de trois années de travail, je tenais à faire les présentations. Je m'appelle Robin Gueguen et je viens de vous soumettre ce document intitulé "Virtualisation architecturale visuelle et auditive du théâtre antique d'Orange". Ce travail interdisciplinaire est pour le moins atypique, et à projet atypique, profil atypique. Après deux années de classes préparatoires et trois années d'école d'ingénieur j'obtiens mon diplôme avec une spécialisation en optronique. Je participe ensuite aux développement de LIDAR (Radar-Laser) utilisés pour la mesure atmosphérique au sein de la société Leosphere. Rattaché au service de recherche et développement et particulièrement à la section optoélectronique j'acquière pendant quatre année l'expérience du monde industriel. En 2015 j'apprends l'existence de la collaboration entre l'Institut du Calcul et de la Simulation (ancien nom de l'ISCD) et de la Sorbonne autour de la virtualisation du théâtre d'Orange. Passionné aussi bien par les arts graphiques que les arts du spectacle, le projet me séduit tout de suite et je quitte mon emploi pour démarrer ces trois années de thèse. Je découvre alors le monde de l'archéologie et architecture mais aussi celui de la modélisation 3D et du développement logiciel. Je me forme aux principes de l'acoustique de salle et jongle avec les différentes attentes que chaque spécialité. J'imagine qu'il est peu probable que ce document ne trouve un lecteur mathématicien spécialiste en archéologie, architecture, modélisation graphique, acoustique, algorithmie. C'est pourquoi je vais tenter d'être le plus clair possible dans chacune de mes parties pour permettre à chacun d'accéder sans encombre aux sujets où il sera néophytes. L'enjeu de ce projet est surtout d'entrevoir une chaîne complète de développement avec à la base : ce monument antique, et suite à un ensemble complexe de manipulations mathématiques en obtenir de nouvelles informations archéologiques jusqu'alors inaccessibles.

Remerciements

Tout d'abord je souhaite remercier Emmanuelle Rosso et Pascal Frey mes deux directeurs de thèse pour avoir pensé à ce projet ambitieux et m'avoir fait confiance pour le mener à bien. Je remercie également chaleureusement François Alouges de l'école Polytechnique pour son suivi réconfortant et pour avoir su apporter les mots juste tout au long du projet. Pour son aide précieuse et son oeil expert d'archéologue je remercie mon collègue de l'ISCD Titien Bartette qui m'a largement guidée au travers des vestiges du théâtre d'Orange. Un grand merci à François Salmon du CMAP pour ses conseils et explication en développement logiciel et traitement du signal de même qu'à Loïc Norgeot de l'ISCD pour la partie blender et visualisation. Ils ont tous deux su m'apporter leur expérience au moment opportun.

Je voudrait également remercier Alain Badie et l'équipe de l'IRAA pour m'avoir fourni leurs relevés et documents indispensables à la réalisation du modèle numérique du théâtre d'Orange. Merci à Jean-Dominique Polack du LAM pour ses cours d'acoustique de salle et pour avoir partager avec nous ses connaissances du le théâtre d'Orange et une partie de son matériel.

Merci à Delphine Aubry, Marie Duboué, Alexia Maximin, Noël Dimarcq, Tristan Briant, Guillaume Reuiller pour m'avoir accueilli et épaulé lors de passionnante mission doctorales de conseil ou de médiation scientifique.

Merci également à les collègues de l'ISCD pour leur bonne humeur : Lydie, Chiara, Sylvia, Sébastien, Agnès, Paule, Delphine, Christelle, Aurélyane, Jérémie.

Bien sur rien de tout cela n'aurai été possible sans Matthieu Aussal du CMAP qui fut pour moi (et je crois qu'on ne peut pas mieux le décrire) un véritable "bâton de berger" durant ces trois années.

Merci à la merveilleuse Doudou pour ses encouragements continus sa grande beauté son sens de l'humour tonitruant!

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, les basiliques et le Pulpitum	8
1.3 L'Orchestra, les aditus et la cavea	10
1.4 Les couvertures et le velum	13
2 Modélisation	17
2.1 Introduction	18
2.2 La cavea et ses substructures	19
2.3 Maenianum	22
2.4 Aditus	24
2.5 Le mur de scène et ses basiliques	25
2.6 Le pulpitum et l'orchestra	26
2.7 La colline Saint-Eutrope	26
3 Propositions de reconstitution	29
Conclusion	31
Références	33
II Calculs acoustiques	35
Introduction	37
4 Acoustique de salle	39
4.1 Introduction à l'acoustique de salle	40
4.2 Méthodes de calcul acoustique	40
4.3 Méthode couplée	40
5 Logiciel développé	41
5.1 Introduction	42
5.2 Lecture de maillage	42
5.3 Calcul de rayon	42

5.4 Calcul de sources-images	42
5.5 Génération de réponse impulsuel	42
5.6 Méthode d'octree	42
5.7 Vue d'ensemble	42
6 Validation	43
6.1 Introduction	44
6.2 Comparaison aux cas test	44
6.3 Analyse de complexité	44
Conclusion	45
Références	47
III Analyse acoustique du théâtre d'Orange	49
Introduction	51
6.4 Maillage en test	51
6.5 Matériaux	51
7 Résultats sur le théâtre d'Orange	53
7.1 position des spectateurs	54
7.2 Présence de spectateurs	54
7.3 Présence de velum	54
7.4 Forme et matériaux du toit	54
8 Comparaison avec d'autres théâtres antiques	55
Conclusion	57
Références	59
A Annexes	I
A.1 Figures annexes	I
A.2 Tableaux annexes	III
B Liste des acronymes	V
C Glossaire	VII
D Liste des symboles	XI

Liste des figures

1	Théâtre d'Orange avant restauration	6
1.1	Vue d'ensemble du théâtre d'Orange	8
1.2	Vue de dessus - 1er niveau	11
1.3	Vue de dessus - 2ème niveau	12
1.4	Vue de dessus - 3ème niveau	13
1.5	Toitures de basiliques par A.Badie	14
1.7	Velum	16
2.1	Coupe théorique sur la cavea	20
2.2	Parodos oriental et entrée menant à l' <i>ima cavea</i>	22
2.5	Plan topographique de la colline Saint-Eutrope	27
A.1	Plan du rez-de-chaussée au bâtiment de scène	II

Liste des tableaux

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. Comme le disent Alain Badie, Jean-Charles Moretti et Dominique Tardy dans "*Pouvoir du théâtre et théâtre du pouvoir*", "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 transalpine qu'August réorganise par la suite en province de Narbonnaise. L'architecture urbaine est alors régie par les écrits de **VITRUVE** [-15] et de nombreux théâtres sont construit comme celui d'Arles en 20 avant notre ère. La construction du théâtre de 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 quelques dizaines d'années. [BADIE et collab., 2007] Cette origine nous est d'ailleurs rappelée par la présence du sigle C.I.S (*Colonia Iulia Secundanorum*) inscrit à plusieurs endroit du grand mur du **postscaenium FORMIGÉ** [1923].

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 (fig. 1a). 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 écrits 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 apparaissent 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 restaurations ou constructions ont été effectués 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 mondiale 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 créations 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.



(a) Vue de la scène avant le déblaiement par A. Caristie, 1856 (cliché Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Charenton) (b) Vue intérieure du théâtre, par Asselineau, XIX^e siècle, Musée d'Art et d'Histoire d'Orange

FIGURE 1 – Dessins du théâtre d'Orange avant et après déblaiement par A. Caristie

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	L'Orchestra, les aditus et la cavea	10
1.4	Les couvertures et le velum	13
1.4.1	La couverture des basiliques et du parascaenium	13
1.4.2	La couverture du postscaenium et du Pulpitum	15
1.4.3	La couverture de la cavea	15

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 conservés pour la plupart à la Médiathèque de l'architecture et du patrimoine à Charenton-le-Pont. Ceux-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. Collé au flanc est au théâtre se trouvent les ruines d'un sanctuaire du culte impérial qui ne fait pas partie de l'étude.

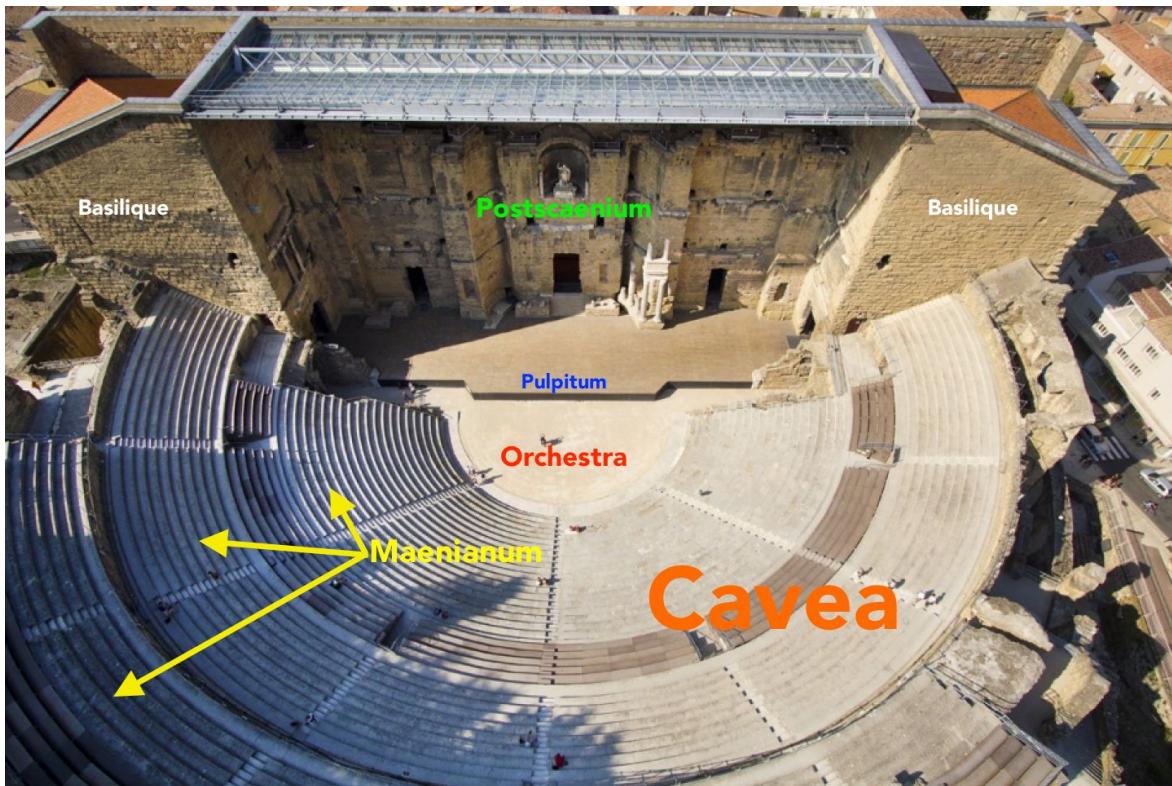


FIGURE 1.1 – Vue d'ensemble du théâtre d'Orange (cliché de Boudereaux sur choregies.fr)

1.2 Le [postscaenium](#), les [basiliques](#) et le [Pulpitum](#)

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 (voir '[Analyse acoustique du théâtre d'Orange](#)' on page 51). Les côtés est et ouest donnaient sur des rues, alors qu'adossé à la façade nord se trouvait une [Porticus](#)

post scaenam large d'environ neuf mètres. Celle-ci se trouvant à l'extérieur du théâtre, elle ne fera pas partie de l'étude. Elle donne néanmoins accès au **postscaenium** par le biais de dix-sept portes reparties de manière symétrique par rapport à la porte centrale. Sur la partie haute de la façade se trouve deux séries de **consoles** ainsi qu'une assise de bouches d'eau qui permettaient d'évacuer les eaux qui tombaient sur le toit du bâtiment de scène. Les **consoles** de la série supérieure (mis à part les deux situées aux extrémités) présentent un trou traversant permettant d'accueillir le mât. Celles de la série inférieure sont creusées à leur lit d'attente d'une grande mortaise circulaire prolongée par un petit trou permettant l'écoulement de l'eau de pluie. Pour pouvoir placer un mât dans un couple **consoles** il fallait également que l'assise de bouche d'eau soit percée. Or cela n'est le cas que pour douze emplacements correspondant aux mâts nn° 4 à 9 à partir des deux extrémités du mur. Il semble que les mâts n'aient été présents qu'à ces emplacements, c'est à dire au niveau des **basiliques** et non du mur de scène pour soulager ce dernier d'une trop forte tension liée au poids du **velum**. Néanmoins, il est aussi possible de supposer que les **consoles** aient été initialement prévues pour couvrir l'estrade par des voiles montées sur des vergues comme à Aspendos et que l'idée fut abandonnée en cours de construction au profit d'une toiture de tuiles sur charpente de bois MORETTI [1993]. L'intérieur du **postscaenium** comporte huit pièces donnant uniquement sur la **Porticus post scaenam** à l'extérieur du théâtre. Ces pièces servaient de coulisse l'habillement des acteurs ou le stockage des décors et costumes. Trois portes, dont la porte royale, donnent directement accès à la scène. Deux portes de part et d'autre amène aux **basiliques** et une au **parascaenium** et à des escaliers permettant de monter aux étages supérieurs. À l'intérieur du **postscaenium**, en plus du rez-de-chaussé et des combles, on compte deux étages assurés par la présence de baies à arcature permettant de passer d'une pièce à l'autre à l'intérieur du mur. Cela permettait aux acteurs d'accéder à des niches traversante en hauteur pour faire apparaître par exemple des personnages divins ou effectuer des bruits de tonnerre.

La façade sud du mur (ou front de scène) est celle qui servait de décor aux spectacles. Aujourd'hui, il ne reste que le mur en calcaire de Courthézon (calcaire de couleur jaune foncé-beige) qui été jadis caché par des ornements en marbre. On y trouve plusieurs niches de diverse profondeur ainsi que les traces d'encastrement du placage de marbre qui servent de repère aux archéologues pour reconstituer la décoration. Le mur a une géométrie symétrique par rapport à l'axe décrit par la porte royale rectangulaire et la niche voutée située au dessus et accueillant aujourd'hui une statue dite "d'Auguste" (faite de ciment et de fragments antiques et placée là en guise de décoration en 1944). Cet axe est placé sur une paroi rectiligne qui fait saillie au fond d'une **exedre** curviligne ce qui donne un effet de "focus" vers la porte royale et la niche voutée. De part et d'autre se trouvent deux **exedres** rectangulaires peu profondes. Le mur est découpé verticalement en trois ordres sur les extrémités et seulement deux sur la partie centrale. Au dessus se trouve l'espace réservé au toit qui couvrait le **postscaenium** et la scène. On y voit aujourd'hui les trous d'encastrement dans lesquelles venaient s'insérer les poutres.

Le mur de façade du bâtiment de scène est flanqué de part et d'autres de deux **basiliques** de forme presque carrée auxquelles on accède depuis la scène par une grande porte rectangulaire et un **parascaenium**. Celui-ci comporte un escalier permettant d'atteindre les niveaux supérieurs du **postscaenium**. Les **basiliques** sont composées de deux niveaux séparés par un toit en bois et accessible que depuis le rez-de-chaussée. On retrouve cela dans les théâtres d'Arles, Aspendos ou de Marcellus à Rome par exemple. Leur taille monumentale semble indiquer une fonction de foyer luxueux permettant aux spectateurs de se retrouver pendant les entre-actes ou en cas d'intempéries. Elles pouvaient également

servir de coulisse pendant les spectacles ou pour stocker les éléments de décor volumineux. Ces salles étaient accessibles par les trois cotés autres que la scène par un couple de baies à arcature. Une baie à arcature donne également sur le postscaenium qui s'ouvre dans le même alignement sur la scène via une porte rectangulaire.

La scène ou **Pulpitum** était une structure en bois d'une largeur de 61m et d'une profondeur de 10m et a complètement disparu. Elle était ornée en sa devanture par une décoration de marbre souvent composée de niches rondes ou carrées alternées. Vitruve dit que sa hauteur ne doit pas excéder cinq pieds (soit 1m50) afin que les spectateurs assis dans l'orchestre voient facilement. Celle de Orange s'élève à 1m20 d'après les traces laissées sur le mur de scène. En dessous se trouve l'hyposcaenium qui étaient composé principalement d'une fosse et d'un espace dédié à la machinerie du rideau de scène. Effectivement, entre le mur de front du **Pulpitum** et la scène, un rideau en étoffe peinte ou tissée d'une hauteur de moins de trois mètres descendait pour laisser apparaître la scène aux spectateurs. Il venait s'enrouler autour de cylindres et était actionné par un système de poulies et contrepoids. Une fois descendu, le plancher venait se refermer au dessus de cet espace permettant ainsi aux acteurs de s'approcher jusqu'au bord du **Pulpitum**, voire de descendre au niveau de l'**Orchestra**. Le plancher était soutenu par des poutres et les acteurs ou les machinistes pouvaient se rendre en dessous par le biais de trappe et d'escaliers. Le mur de décoration est par ailleurs bordé par un caniveau afin d'évacuer les eaux de pluie.

1.3 L'**Orchestra**, les **aditus** et la **cavea**

L'**Orchestra** est la partie semi-circulaire située entre la scène et le premier gradin. Anciennement nommée "choros", chez les grecs qu'elle y accueillait le chœur, elle ne sert plus aux représentations chez les romains et certains spectateur de marque pouvaient s'y installer. Aujourd'hui recouverte de graviers compact elle pouvait être à l'époque dallée de marbre ou pavé de pierres colorées. L'**Orchestra** était limité par un **balteus** qui marquait la séparation avec la **cavea** et qui surplombait un petit caniveau permettant d'évacuer l'eau de pluie. Elle comportait aussi des escaliers qui pouvaient mener à la scène soit par le centre soit par les extrémités [FORMIGÉ, 1923, p. 52].

Depuis l'extérieur du théâtre on accède à ce lieu par deux larges **parodos** formant les **aditus**. Chacune est composée d'une succession de trois voûtes en décrochement qui portaient les extrémités de la **cavea** et les tribunes. Celles-ci, considérées comme des places d'honneur étaient souvent décorées de sculpture comme à Dougga ou à Herculaneum et étaient accessible par des escaliers particuliers. Ces entrées étaient dallées sur toute leur longueur mais sont aujourd'hui recouvertes par un sol moderne [BADIE et collab., 2013a, Pl. XVI].

La **cavea**, telle qu'elle a été restaurée, comprend trois hémicycles appelés **maenianum**, séparée l'un de l'autre par une **precinctio** et un **podium**. Cela a été déduit par Caristie de par le profil des **aditus** et les vestiges des substructures et fut reconstruit en ce sens par Formigé. Chaque **maenianum** est divisé en un certains nombre de sections appelées **cuneus** par des escaliers. La forme de la **cavea** ne suit donc pas les tracés de VITRUVE [-15] de demi-cercle exacte mais présente plutôt une forme de fer à cheval.

Le premier **maenianum**, ou *ima cavea* est séparé par cinq escaliers en quatre **cuneus** comme le révèle les vestiges des premiers gradins dégagé pendant les fouilles. Il comprend un repos-pied à sa base et vingt gradins comme à Aspendos, à Athènes (odéon d'Hérode Atticus) ou à Pompéi (grand théâtre). Leur hauteur moyenne est de 40cm et leur largeur de 80cm FORMIGÉ [1923]. Au niveau de la première **precinctio** neuf ouvertures

donnent sur un couloir souterrain (premier **ambulacre**). Ce dernier est accessible depuis l'extérieur du théâtre au rez-de-chaussée par deux escaliers longeant les **aditus**. Le couloir ouvre aussi sur dix-huit pièces aveugles, mais seules les salles numérotées de 1 à 8 (fig. 1.2) sont des constructions antiques. Il était également possible de rejoindre le premier **maenianum** à mi-hauteur depuis les **parodos** par le biais de deux escaliers installés sous les gradins. Ceux-ci n'ont pas été remis en fonction lors de la restauration. Les **Vomitorium** et les **precincts** étaient généralement bordés de balustrades souvent ornées de sculptures.

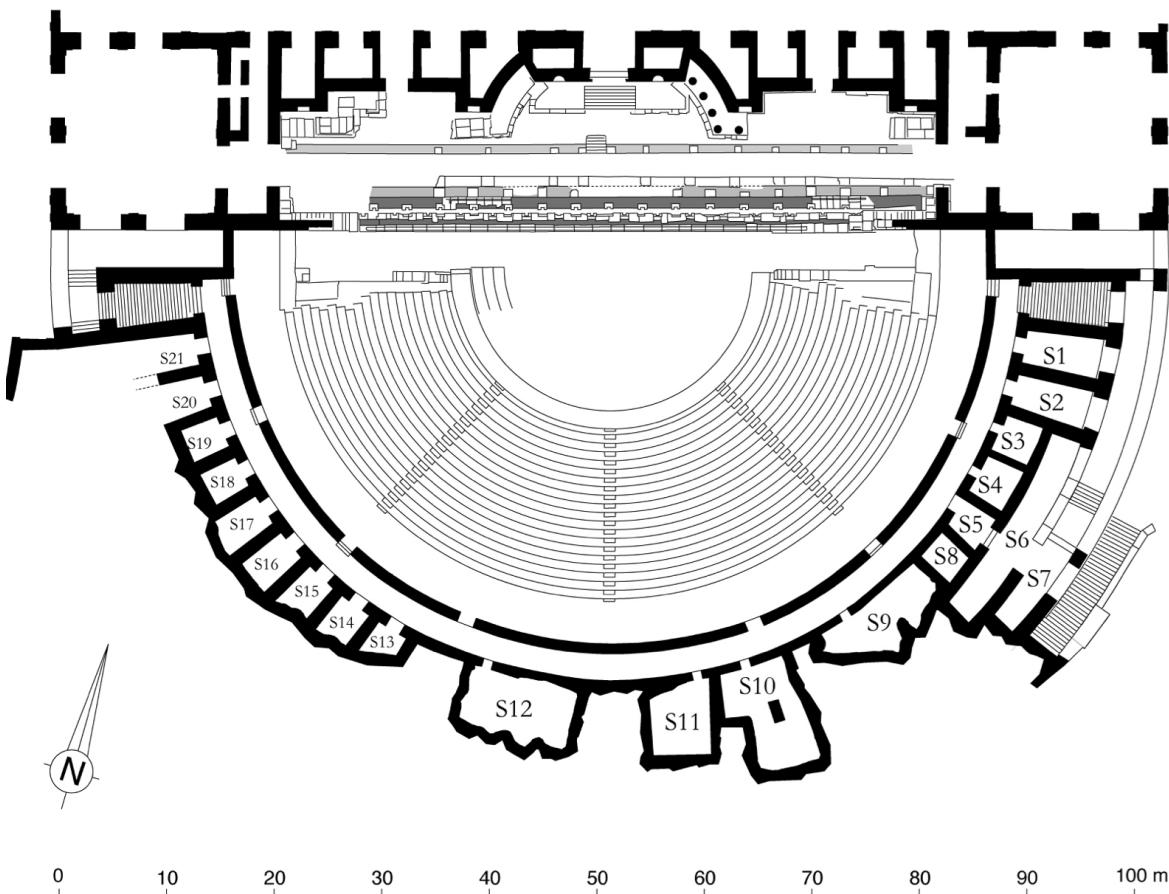


FIGURE 1.2 – Plan du théâtre au niveau du premier ambulacrum [BADIE et collab., 2013a, Pl. XVII]

Le deuxième **maenianum**, ou *media cavea*, repose, dans sa partie inférieure, sur l'**ambulacre** du premier niveau 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 actuellement neuf gradins divisés en huit **cuneus** par neuf escaliers ce qui semble être un choix acceptable au vu du corpus comparatif. Par ailleurs Caristie a relevé l'existence de cinq caissons de soutènement (C7 à C11 - fig. 1.3) situés sous la *summa cavea* et délimitant les passages permettant de se rendre au second **ambulacre**. Celui-ci est souterrain dans la zone où la **cavea** est adossée à la colline 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*, comporte cinq gradins divisés également par neuf escaliers. On constate que la largeur de ses gradins diminue lorsqu'on s'élève, ainsi, ils ne mesurent plus que 72cm en moyenne sur le troisième **maenianum**. Il était jadis couronné par une **Porticus in summa cavea**, dont l'existence est assurée par des traces sur les faces méridionales des murs des **basiliques**. D'une largeur de 3m55 il semble qu'il

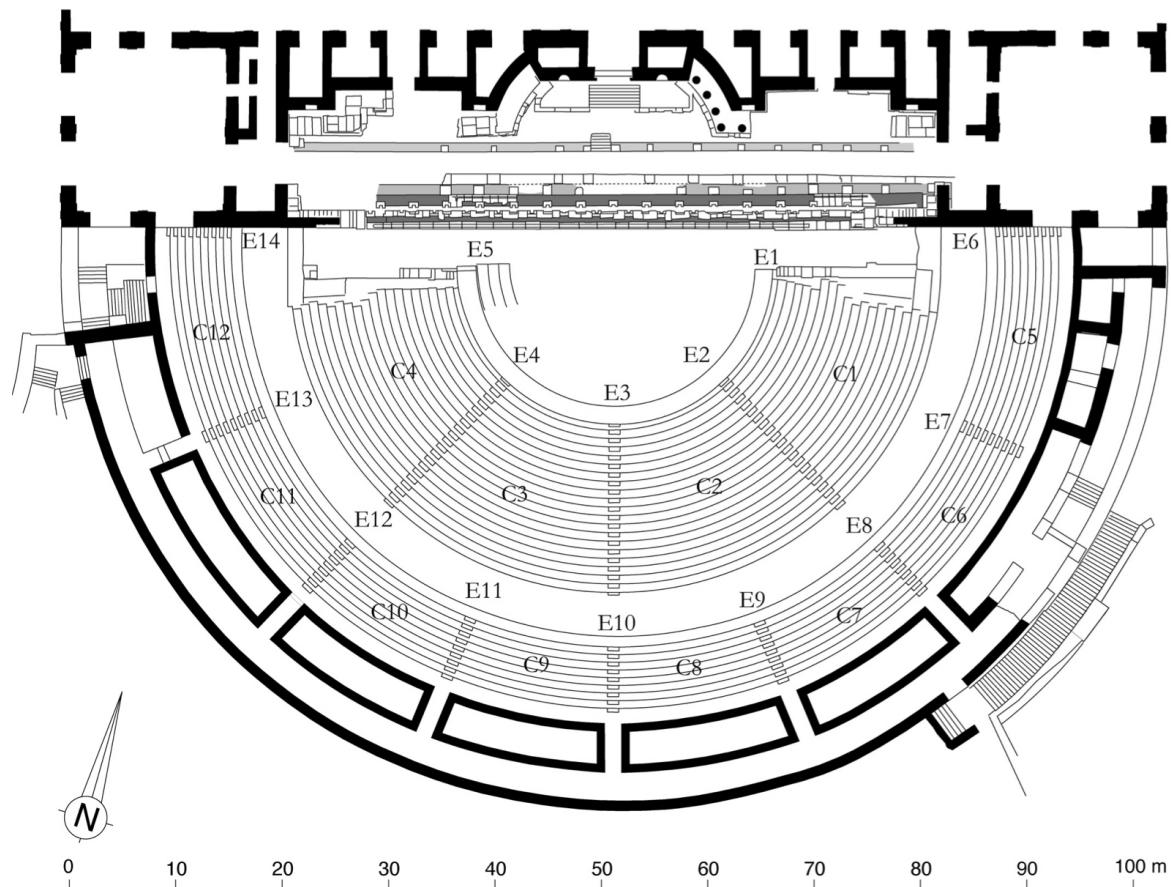


FIGURE 1.3 – Plan du théâtre au niveau du second ambulacre [BADIE et collab., 2013a, Pl. XVIII]

n'ai été accessible que par les machiniste du **velum FORMIGÉ [1923]**. On trouve aujourd'hui des gradins sur échaffaudage à cet emplacement de même que sur les deux premières **precincts**. Une rue périphérique enclavé la **Porticus in summa cavea** séparée par un mur que J-C Formigé avait percé de quatre portes au niveau des escaliers E9 à E12 (fig. 1.3 et 1.4). L'accès en face de E9 est probable, non seulement parce qu'H. Daumet a noté une interruption du mur périphérique à cet endroit, mais aussi parce que le mur bordant la rue en amont est également percé d'une porte dans la prolongation de E9.

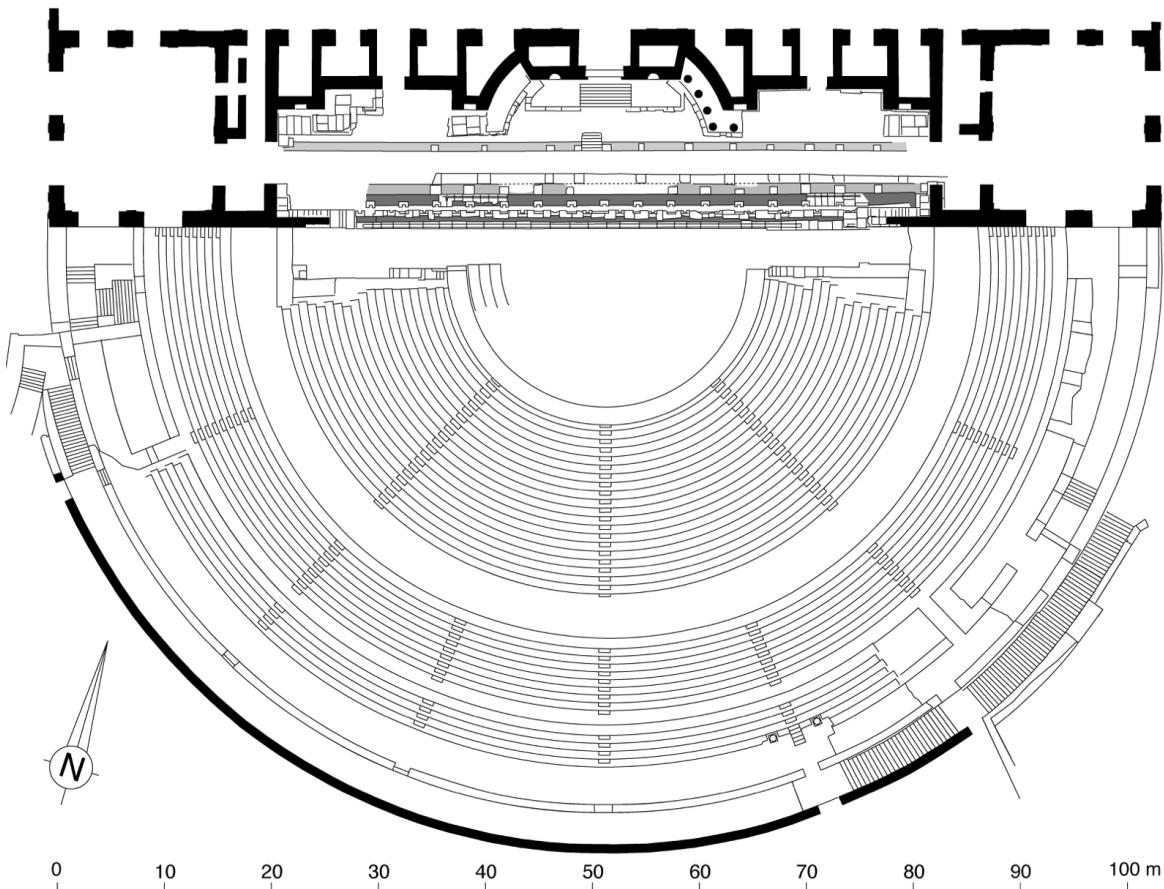


FIGURE 1.4 – Plan du théâtre au niveau de la rue périphérique [BADIE et collab., 2013a, Pl. XIX]

1.4 Les couvertures et le velum

1.4.1 La couverture des **basiliques** et du **parascaenium**

La toiture qui figure aujourd'hui au-dessus des **basiliques** et du **parascaenium** (installée en 2006) reflète au peu près la proposition de restitution qu'avait fait A. Caristie à savoir un toit à double pente avec **arêtier** sur la diagonale partant de l'angle du mur arrière. L'étude de l'**IRAA** tend à corriger cette hypothèse en supposant plutôt la présence de deux toitures successives et, au-dessus de la cage d'escalier d'un petit toit à double-pente permettant non pas l'accès aux combles mais de monter sur le toit lui-même 1.5. Cette dernière hypothèse provient des traces symétriques situées au-dessus de la cage d'escalier orientale et donne de nouvelles pistes aux archéologues sur la façon de fonctionner des architectes de l'antiquité et les moyens d'entretiens du bâtiment dont ils disposaient. Au niveau de la paroi sud de la **basilique** la toiture fait une pente de 21° sur 14.22m et à

partir du mur faisant jonction avec la cage d'escalier descend sur 15.44m jusqu'au niveau des bouches d'évacuation d'eau.

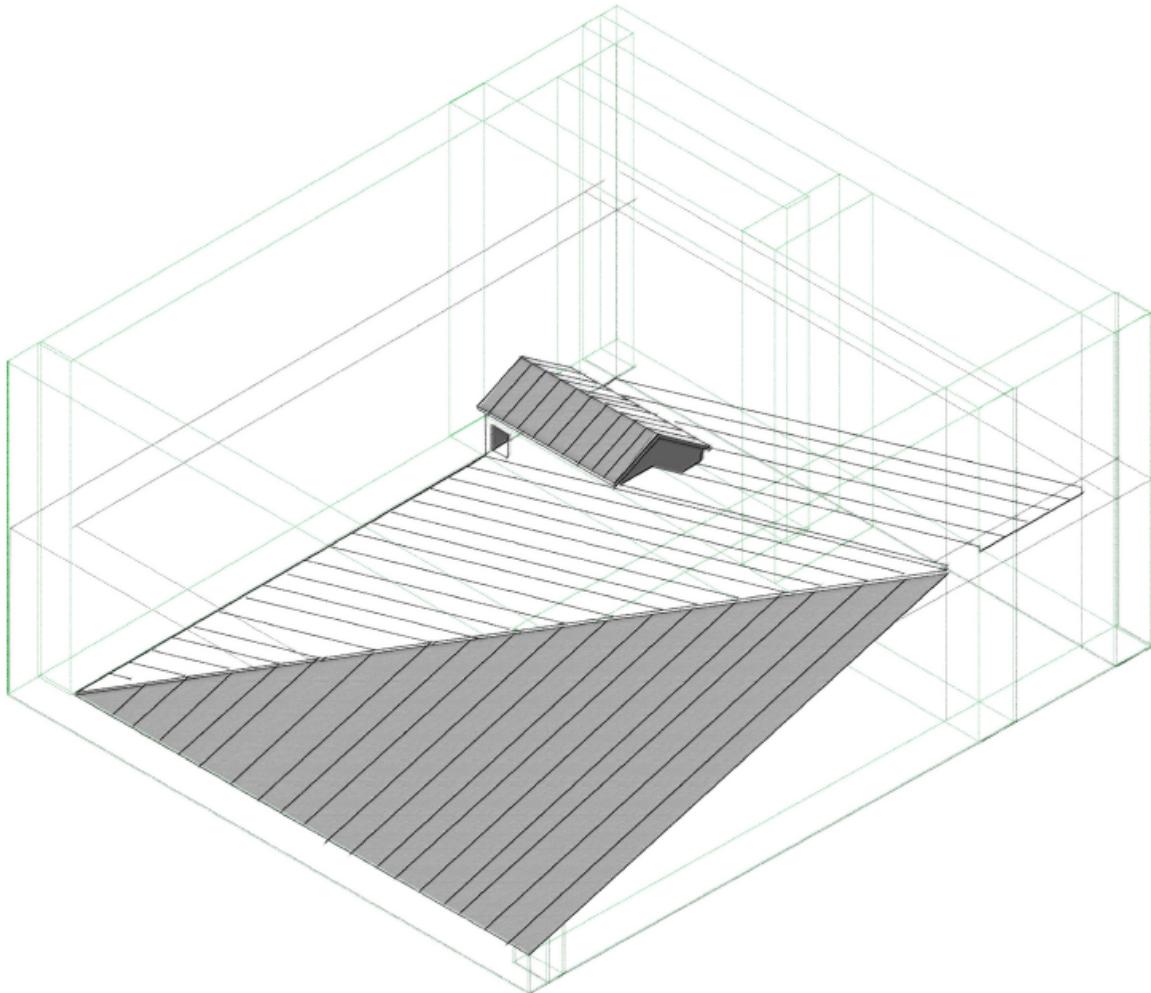
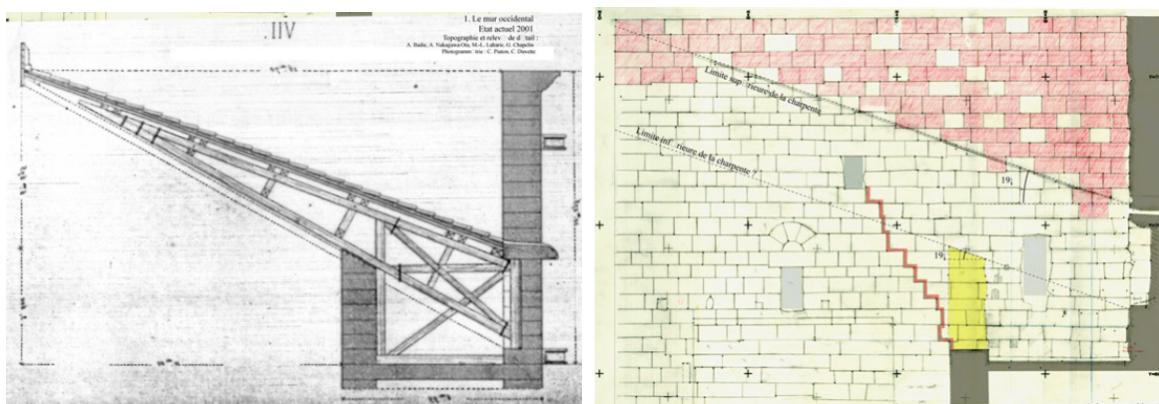


FIGURE 1.5 – Proposition de restitution des toitures de la **basilique** occidentale, de la cage d'escalier et du **parascaenium** [BADIE et collab., 2013a, Pl. XLVII]

1.4.2 La couverture du **postscaenium** et du **Pulpitum**

Comme pour les toitures des **basiliques** évoquées précédemment, le **postscaenium** et le **Pulpitum** possèdent une couverture récente cette fois faite en métal. Le choix de cette toiture reste sujet à controverse car bien que l'acier présente de nombreux avantages face au bois (poids, résistance au temps, etc), il dénature l'aspect esthétique du bâtiment de par son anachronisme. La version antique n'a laissé aucun vertige en elle-même car elle devait être faite en matériaux périssable et semble avoir subit un ou plusieurs incendies. Néanmoins les études de A. Caristie puis de l'**IRAA** par la suite permettent d'entrevoir la forme de cette couverture. Premièrement, on distingue dans la partie sommitale du mur de scène des cavités d'encastrement permettant d'accueillir la charpente de la toiture elles-mêmes couronnées par une série de déversoirs par lesquels s'échappait l'eau de pluie. Deuxièmement, on peut observer une saignée sur le mur occidental indiquant la pente de la partie supérieure de la charpente (fig. 1.6b). Troisièmement on constate que le mur sud du **postscaenium** (le front de scène) se terminait avec une pente de 19° d'après les marques laissées par un incendie sur les murs latéraux et ceci qui nous reflète la pente

inférieure de la toiture. A. Carsitie a proposé une restitution de la couverture (fig. 1.6a) en s'inspirant des grues en bois utilisées à son époque et précise qu'il s'agit de "la combinaison qui" lui "a paru la plus vraisemblable, sous le rapport de la construction, pour la couverture du proscenium sans prétendre cependant que ce soit la seule solution possible de cette intéressante question". Effectivement le rapport [BADIE et collab. \[2013b\]](#) conteste la forme triangulaire proposée par A. Caristie en faveur d'une forme parallélépipédique qui semble plus vraisemblable compte tenue du parallélisme des traces évoquées plus haut (fig. 1.6b). Par ailleurs cela coïncide avec la présence d'ouvertures au sommet des murs latéraux permettant probablement d'atteindre la partie antérieur du comble alors que la proposition de A. Caristie les obstruait partiellement. Cette forme de toiture semble d'autant plus plausible au niveau architecturale qu'il en a été retrouvé des similaires dans les archives d'autres monuments. Cependant, il a été constaté que les cavités d'encastrement ont été plusieurs fois ajustées, agrandies ou rétrécies ce qui suppose qu'il y aurait eu plusieurs toitures installées au cours de la vie du bâtiment. Notre étude pour ainsi permettre de restituer différentes versions et de les comparer entre elles.



(a) Proposition de restitution de la couverture de la scène par A. Caristie
 (b) Relevé de la partie sommitale du retour ouest du front de scène [BADIE et collab., 2013b, Fig. 24]

1.4.3 La couverture de la **cavea**

Il est reconnu que les théâtres romains possédaient généralement un appareillage permettant de déplier au dessus des spectateurs de longues toiles appelées des *vela* et communément assimilé à un ensemble unique : le **velum**. Celui-ci permettait aux spectateurs d'être protégé du soleil et se déployait probablement partiellement en suivant le déplacement de l'astre notamment pour garantir une bonne ventilation. Nous savons d'après [PLINE \[77\]](#) que "ce fut seulement après Cléopâtre qu'on fit usage des toiles de lin pour donner de l'ombre dans les théâtres" [FORMIGÉ \[1923\]](#). Nous avons déjà évoqué plus haut les **consoles** permettant d'accueillir les mâts auxquels étaient accrochés les cordages. Il y en a douze au niveau du mur de scène et vraisemblablement tout autour du mur périphérique de la **cavea** (dont il ne reste malheureusement aucune trace). Les modèles les plus courant représentent le **velum** par un anneaux situé au dessus de l'**Orchestra** auquel sont attachés les cordages qui permette de le hisser par un système de poulie. Nous avons vu que les machinistes se plaçaient probablement au niveau de la **Porticus in summa cavea** pour dans un temps hisser l'anneau puis ensuite déployer certaines *vela* au moment approprié.

Le théâtre d'Arles présente un certain nombre de trous au niveau de son premier gradin qui semblent avoir accueilli des mâts de soutien pour le *velum*. À côté de ceux-ci on trouve de plus petits trous probablement utilisés pour fixer les cordes. Cette particularité a peu été observer par ailleurs et pourrait être du à la présence d'un fort mistral dans cette région et donc pourrait également avoir été mis en place à Orange. A. Caristie propose une restitution de *velum* avec un anneau semi-circulaire et 67 mâts autour de la *cavea* (fig. 1.7).

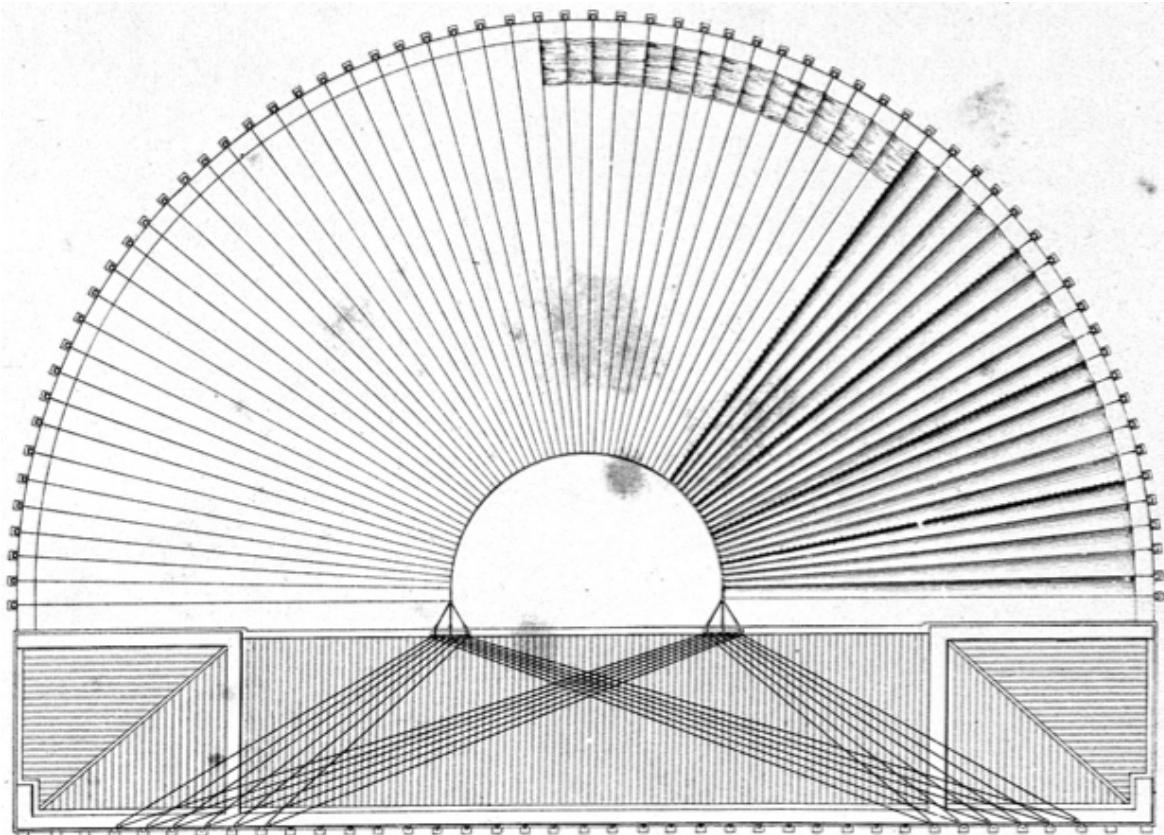


FIGURE 1.7 – Proposition de restitution du velum d'Orange par A.Caristie

Chapitre 2

Modélisation

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

Léonard de Vinci

Sommaire

2.1	Introduction	18
2.2	Le mur de scène et ses basiliques	18
2.3	Le pulpitum et l'orchestra	19
2.4	La colline Saint-Eutrope	19
2.5	La cavea	19
2.6	Maenianum	19
2.7	Aditus	20

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 ces quelques dernières années, les analyses architecturales antiques étaient principalement menées à l'aide de plans, de dessins, 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 des dessins ou des maquettes en terme de côtes, formes, aspect. Mais se rajoute à cela qu'à partir d'un modèle numérique unique, on peut sélectionner les quelles informations l'on souhaite étudier tout simplement en changeant l'objet affiché, la vue ou le mode d'affichage. On peut par exemple observer un monument par vu du dessus avec ses cotes en étudier ainsi le plan 2D correspondant. Mais on peut également réaliser une impression 3D de l'objet pour en avoir une maquette physique à l'échelle réduite. Un seul et même outil permet donc d'obtenir l'ensemble des informations que l'on souhaitait acquérir par le passé tout en améliorant leur qualité grâce à la précision des ordinateurs. Un modèle numérique 3D peut par ailleurs être utilisé par des logiciels de calcul ou de simulation afin de tester des comportements physiques tels que les écoulement de fluide ou l'acoustique par exemple. Il en est de même pour les questions architecturales d'agencement de décor ou de portance par exemple. Il permet également de réaliser des animations (déplacement de personnages, ouverture de haut-vents, ...) ou des visites immersives grâce aux technologies de réalité virtuelle. On peut alors visualiser son objet d'étude dans son ensemble ou bien partie par partie à l'aide de technologies telles que les écrans 3D, les caves (écrans géants parabolique ou cubiques) ou les casques de réalité virtuelle nous plongeant littéralement au coeur de l'objet.

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 existe principalement deux techniques le plus souvent 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 corrélérer 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 utiliser la deuxième méthode dite de [CAO \(conception assistée par ordinateur\)](#). Il s'agit de retrancrire le monument par des formes géométriques 3D plus ou moins complexes.

Il existe cependant un certain nombre de logiciels permettant d'utiliser cette technique et nous citerons parmi les plus connus : *AutoCAD*, *CATIA*, *SketchUp*, *3DSMax*. Après une étude comparative, le choix s'est porté sur le logiciel *Blender* car celui-ci possède l'avantages d'être :

- gratuit
- multiplateforme (Windows, Mac, Linux)
- modulaire (de nombreuses fonctionnalités peuvent y être ajoutée selon les besoins)

- suivi et commenté par une large communauté

Par ailleurs, Blender :

- permet un rendu réaliste, voir photo-réaliste) notamment grâce au texturage
- permet de réaliser des animations et des vidéos
- utilise des effets physiques tel que la gravité, la déformation de type tissu, l'écoulement de fluides ...
- peut exporter les maillages sous différents formats couramment utilisés (obj, fbx, stl, ...)
- permet le développement de script en python

Toutes ces spécificités vont être utilisées dans le projet et c'est pourquoi c'est ce logiciel qui a été choisi. Il comporte néanmoins quelques limites notamment sa difficulté de prise en main, le fait qu'il soit peu utilisé dans le milieu architectural et que son "*game engine*" soit de moins bonne qualité que certains de ses concurrents (Unity ou Unreal Engine par exemple). En ce qui concerne ce dernier point, cela n'est pas gênant car Blender peut exporter des modèles texturés dans Unity ou Unreal pour des visites virtuelles de très haute qualité.

Dans ce chapitre nous allons donc présenter comment le théâtre antique d'Orange a été modélisé avec Blender, quelles ont été les difficultés soulevées et les astuces utilisées. Il sera préciser quels sont les informations architecturales et archéologiques que concatène le modèle numérique ainsi que les sources qui ont permis de les implémenter. Avant de détailler uns par uns les éléments modélisés, il faut voir le modèle dans son ensemble et notamment dans son repère. Sur le plan XY, c'est à dire le plan de l'horizon on choisit le point (0,0) au centre du demi-cercle formé par l'[Orchestra](#). Nous faisons ce choix car cette dernière ainsi que l'ensemble de la [cavea](#) possède un centre de révolution et il sera plus pratique par la suite, notamment au moment d'appliquer des outils automatiques de placer celui-ci au centre du repère de Blender. Concernant Z ou d'élévation, nous utiliserons les relevés d'altitude présents dans le rapport [BADIE et collab. \[2013a\]](#) et donnant des élévations géoréférencées par rapport au niveau de la mer. Le plan de l'[Orchestra](#) par exemple se trouve donc à 40m sur l'axe des Z.

2.2 La [cavea](#) et ses substructures

La [cavea](#) est le premier élément que nous modélisons car, comme stipulé plus haut, son centre de révolution est situé à l'origine du repère XY. La modélisation se fait à partir de la figure 2.1. La première chose à noter est que sur ce plan, on ne connaît pas la distance par rapport au centre de révolution. Par contre on sait que la paroi extérieure est au même niveau que la bordure des [basilique](#), c'est à dire à 51,96m du centre de part et d'autre (en prenant la moitié de la longueur totale du mur de scène). On part donc de cette paroi extérieure pour dessiner sur blender la coupe de la [cavea](#) en suivant les cotations indiquées. Cependant plusieurs points posent difficulté. Premièrement les gradins sont représentés de manière hypothétique. Pour connaître leur largeur dans le plan, on doit utiliser les quatre lignes de cotations horizontales. Or pour les deux lignes arrivant du niveau du mur du podium au dessus du deuxième [maenianum](#) on a deux informations contradictoires. D'une part, nous avons 8m91 (125+260+113+290+103) et d'autre part 8m69 (35+92+259+483) soit 22cm de différence. Or on estime qu'il n'est pas crédible que le mur soit incliné de la sorte. Trois causes d'erreur sont possibles. Premièrement la mesure qui a été faite a été mal reportée et le document présente une coquille. Deuxièmement, les mesures ne sont

pas toutes effectuées sur un même plan de coupe et d'un endroit à l'autre de la cavea, l'épaisseur des murs peut effectivement varier. Troisièmement, la mesure est exacte mais les pierres s'étant érodées par endroit, on observe des fluctuations d'épaisseur des murs qui n'avait pas lieu à l'origine du théâtre. Pour trancher sur la décision nous adoptons la règle suivante :

Théorème 1 *Lorsque deux cotes sont contradictoires on utilise celle correspondant à la plus grande épaisseur de pierre.*

Cela permet donc de trancher dans le choix des cotes tout en prenant en compte la possibilité que les pierres se soient érodées.

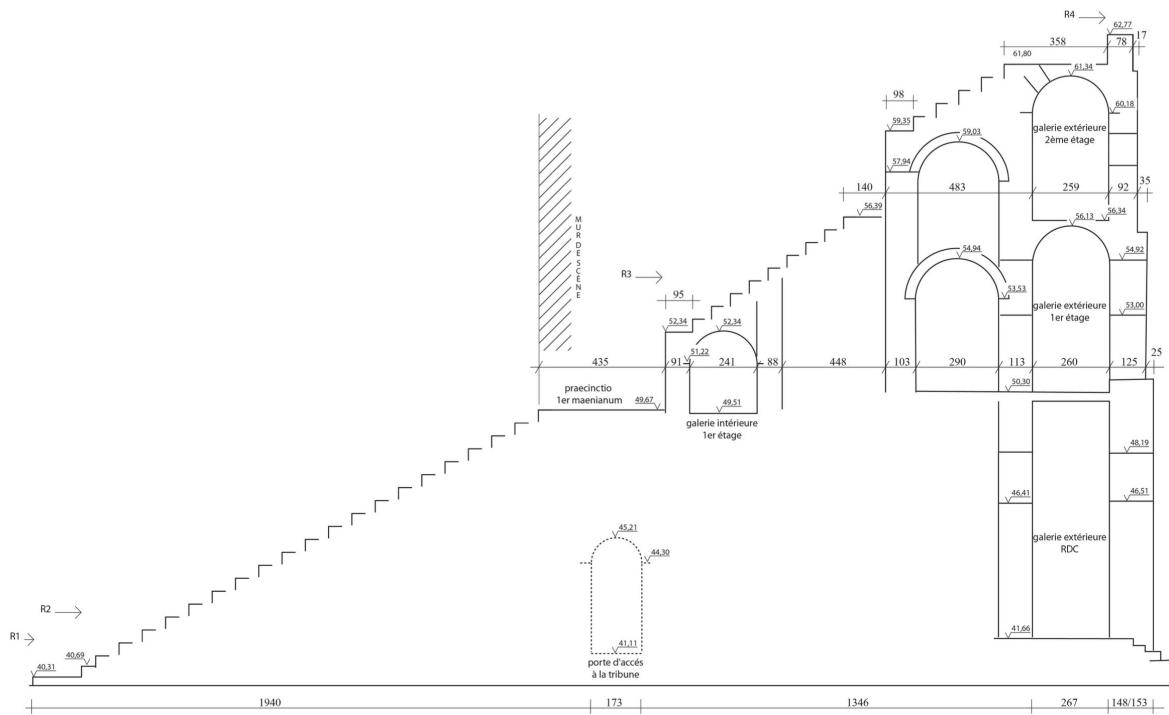


FIGURE 2.1 – Coupe théorique sur la **cavea** [BADIE et collab., 2013a, Pl. LX]

Pour cette même longueur, A. Carisite donne des mesures encore différentes ($455+270+95$). En ajoutant le décrochage de 35cm on obtient 8m55. On voit donc bien que la cavea ne pourra pas être modélisée avec une précision supérieure à quelques dizaines de centimètres en utilisant des cotes communes sur toute la circonférence. Pour obtenir un résultat plus réaliste il faudrait effectuer de nouvelles campagnes de mesure en un nombre significatif de points. Néanmoins, les restaurations de la cavea ayant été très conséquentes, il semble extrêmement difficile de remonter à la structure initiale avec grande précision.

Pour créer la substructure du troisième maenianum nous appliquons donc la règle 1 explicitée plus haut et nous nous référerons à ce plan théorique pour connaître les élévations. Lorsque celles-ci ne sont pas chiffrées et qu'on ne les retrouve pas dans un autre document, nous obtenons la valeur par mise à l'échelle du plan. Nous modélisons également les trois niveaux de galeries qui seront solidaires de cet objet. Les caissons de soutènement situés sous le troisième **maenianum** sont par contre modélisés séparément. Effectivement, contrairement à la cavea, on ne va pas les extruder à 180° mais chaque caisson va être séparé de son voisin laissant l'espace pour les vomitoires du deuxième ambulacre. Effectivement, A. Caristie restitue dans ses plans six de ces caissons de soutènement (dont un incomplet) validant leur origine antique. Ainsi on utilise, à partir de

la figure ?? les cotes en deux dimensions de ses caissons qu'on répète huit fois avec un angle de 21,95° et que l'on extrude à l'aide d'un **modifier "Screw"** qui permet de faire une extrusion circulaire autour du centre de l'objet sur 19,2°. On fait ensuite subir une rotation globale à l'ensemble des huit caissons afin qu'ils soient symétriques par rapport à l'escalier central de la cavea (quatre de chaque côté).

Pour réaliser substructure du deuxième maenianum on complète le modèle afin que la première precinction arrive à l'affleurement du mur de scène. Là encore on trouve un problème de cotes puisque la largeur de la basilique est, d'après la figure A.1, de 1,34+14,22+1,17+3,55+1, soit 21,47m. Or si on calcule 4,35+0,91+2,41+0,88+4,48 on obtient 13,03m. En les ajoutant aux 8,91m déjà modélisés, on arrive à 21,94m soit 47cm de différence. A. Caristie donne 8m entre les podium du deuxième et du troisième niveau contre 8m68 pour M. Fincker et J.M Labarthe. Les deux plans sont par contre cohérent à 5cm près concernant la largeur de l'ambulacre ainsi que l'épaisseur de ses murs. C'est donc au niveau du ramblais soutenant la partie supérieur du deuxième maenianum que se trouvent les écarts de mesure. On part donc de l'angle de la basilique pour créer la precinction le podium et l'ambulacre du premier niveau. La precinction du deuxième niveau est par contre créée à partir du podium du deuxième niveau car on connaît sa longueur et son élévation.

Il reste la substructure du premier maenianum. Ici encore la longueur des gradins n'est pas stipulée. Par contre, A.Caristie nous dit que le repose-pied se trouve à 14m95 du centre de la cavea et que le podium du premier niveau se trouve 20m plus loin. On constate qu'en enlevant les 4m35 de la première precinction aux 34m94 de Caristie on obtient 30m59 ce qui est proche des 30m49 de demi-longueur du mur de scène auquel on ôte la basilique (51m96 - 21m47). En considérant que les gradins ont tous la même largeur pour au sein de chaque maenianum, il ne manque que l'information de la largeur du marche pied et de la couverture du caniveau pour terminer cette partie. Ces dimensions sont encore une fois obtenues par mise à l'échelle des plans.

Une fois ce plan de coupe réalisé on utilise le **modifier "Screw"** pour l'obtenir en volume sur un hemicircle. On peut alors modéliser les arcades donnant sur l'extérieur. Celles-ci sont créées en élévation grâce à cette planche également. Leur largeur de 3,419m est donnée par le plan de A.Caristie [BADIE et collab., 2013a, Pl. XXXIII] en estimant qu'elles ont une largeur identique aux entrées des **aditus**. On peut considérer que les arcades des trois niveaux ont une hauteur différente mais une largeur constante car les parois internes des **aditus** ne présentent pas de marque contredisant cette hypothèse. Si les arcades avaient fait tout le tour de la cavea c'est à dire 180° dans le cas où il le théâtre n'aurait pas été adossé à la colline, il y aurait eu 31 arcades sur chaque niveau. Un triplet d'arcades verticales est donc répétées 31 à l'aide d'un **modifier "Array"** qui permet de répéter n fois un objet avec un angle de 6,13°. Celles-ci sont ensuite soustraite à la **cavea** par un **modifier "Boolean"** qui permet des opérations d'addition, de soustraction ou d'intersection entre objets. Il est bon de noter que pour pouvoir utiliser le **modifier "Boolean"** il faut au préalable appliquer le **modifier "Screw"** (c'est à dire rendre permanent) puis de fermer le maillage. Au niveau de la première et deuxième **precinction** on perce la structure à l'aide d'un **modifier "Boolean"** pour créer les **Vomitorium** qui permettent d'accéder aux ambulacres. La forme qui va être soustraite à la cavea se compose d'un pavé droit créant un trou rectangulaire au niveau du podium puis d'un demi-cylindre extrudé permettant de créer un couloir vouté allant jusqu'à l'ambulacre. Ces passages sont disposés dans l'espace entre deux caissons. La forme est donc répétée avec un angle de 21,95° et la première forme un angle de 2° avec l'axe des x. On utilise donc le même objet de référence pour leur faire subir leur répétition de révolution grâce au **modifier "Array"**. Le niveau bas est au niveau de la **precinction** et le niveau haut arrive à 50cm en dessous du podium en

considérant que l'espace au dessus du vomitoire est du même ordre de grandeur qu'un gradin.

Une porte venant des aditus permet aux spectateurs de se rendre à mi hauteur de l'*ima cavea*. Celle-ci mène à des escaliers qui n'ont pas été restaurés mais dont le plafond vouté est visible aujourd'hui (voir figure 2.2). Pour cet escalier, on sait que la première marche commence à 41,11m d'altitude et la dernière arrive à 45,58m. Or cet escalier débouchait probablement au dixième gradin, à la jonction où la partie basse de la cavea s'arrête et où la partie haute est soutenue par l'aditus. On a donc 20 marches d'une hauteur de 22,35cm. À partir de la première marche, que l'on ajuste en longueur, et l'aide d'un [modifier "Array"](#), on complète l'escalier pour arriver au 10^e gradin. On perce alors la cavea avec un objet représentant l'ouverture dans les gradins. A compléter ...



FIGURE 2.2 – Parodos oriental et entrée menant à l'*ima cavea* [BADIE et collab., 2013b, fig. 418]

À l'est et à l'ouest, le deuxième triplet d'arcades après l'[aditus](#) donnait sur un escalier permettant d'accéder au premier [ambulacre](#). L'escalier oriental (fig. 435) a été restauré avec 31 marches par J.-C. Formigé, qui l'a fait aboutir dans l'ambulacre à un niveau de sol séparé par 4 marches de celui de la première précinctio. A. Caristie restituait un escalier de 24 marches conduisant à un premier ambulacre, dont le niveau de sol aurait été beaucoup plus bas que celui de la première précinctio (pl. VI). Une dizaine de marches aurait permis d'aller de l'ambulacre à la précinctio. Du côté ouest, J.-C. Formigé a restauré un escalier de 32 marches conduisant à l'ambulacre (fig. 428)

2.3 Maenianum

Les maenianum, c'est à dire les gradins, sont modélisés séparément de la cavea. Chacun des trois maenianum est modélisé à partir d'un objet plan de forme quasi-triangle créé d'après la forme du morceau de gradin antique apparent dans le théâtre (figure 2.3a). Les gradins étaient à priori assemblés à partir de blocs rectangulaires sciés en deux sur une diagonale décalée d'une dizaine de centimètre à partir de l'angle. Ce méplat permet de poser les blocs les uns sur les autres. Le reste de leur longueur reposaient sur de l'*opus caementicium*, sorte de remblai constitué de mortier et de tout-venant qui n'est pas modélisé.

À partir de ce plan, on applique un [modifier "Array"](#) selon le nombre de gradins par maenianum, soit respectivement 19, 8 et 4 (la précinctio faisant office de gradin supplé-



(a) Le repose pied et le premier gradin du pre-
mier plan, le mur bordant l'*aditus* est



(b) Modélisation des *maenianum* et de l'em-
pierre *cuneus* : vu de l'extrême nord avec au
prunte des escaliers à retirer après application
des modiflers Array et Screw

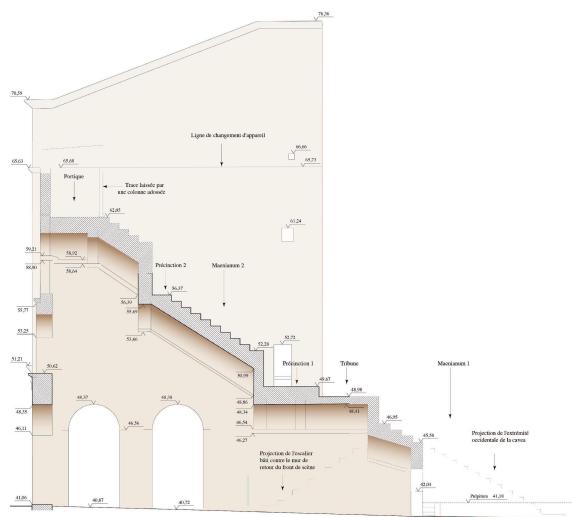
mentaire). On adapte ensuite la longueur et la hauteur pour pouvoir encastrer le meanianum complet dans la cavea précédemment modélisée. Le premier gradin est placé à 15m35 du centre de la cavea laissant un repose pied de 40cm. On peut alors utiliser ensuite un **modifieur "Screw"** pour extruder la forme sur 180°. De la même façon on extrude les formes rectangulaires du repose pied situé devant le premier gradin ainsi que la couverture de caniveau. Au dessus de aditus on duplique la forme de base des trois maenianum pour en faire une partie linéaire de 3,6m à l'aide d'un **modifieur "Solidify"** qui permet de donner une épaisseur paramétrable à un objet plan. Les deuxième et troisième maenianum sont complets tandis que le premier ne comporte que les gradins 10 à 14. Ils sont symétrisés grâce à un **modifieur "Mirror"** qui permet recopier des objets en miroir.

En ce qui concerne les escaliers, chaque marche mesure la moitié de la hauteur d'un gradin. Il s'agit alors de creuser chaque gradin sur son coin extérieur. Pour cela, pour chaque meanianum, on duplique le gradin de base, on lui fait effectuer une rotation de 180° autour de sa normale et on place son coin extérieur au centre du gradin (voir figure 2.3b). On applique alors le même **modifieur "Array"** que pour les gradins pour répéter la forme sur la hauteur du maenianum. On utilise ensuite un **modifieur "Solidify"** pour donner à l'escalier sa largeur. Cette valeur est fixée d'après la [BADIE et collab., 2013a, Pl. XIX] mais reste modifiable. On utilise à nouveau un **modifieur "Array"** pour répéter de manière circulaire les escaliers autour du centre de la cavea. On a ainsi cinq escalier au niveau du premier maenianum et neuf au niveau des deuxième et troisième. L'escalier de référence est sur l'axe X (donc en $y = 0$). Pour le premier maenianum on le repête tous les 45°. Pour les deuxième et troisième maenianum, l'escalier de base est repété comme les caissons et les vomitoires avec un angle de 21,95° en faisant faire une rotation au premier de 23,95° par rapport à l'axe X. Il y a néanmoins une subtilité pour ce qui concerne les marches alignées avec les *parodos*. Pour le premier manenianum, ces marches ne sont pas centrée sur l'axe des x mais décalée de la moitié de leur largeur. Les dix premiers gradins s'arrêtent en $y = 0$ on aurait eu des marches deux fois trop étroite à cet endroit de même qu'au niveau de la tribune. Pour les modéliser, il suffit de dupliquer l'objet de base utilisé pour soustraire les marches et de lui appliquer son **modifieur "Solidify"** uniquement avec un offset de -1 permettant de l'élargir que d'un coté et non de part et d'autre. On effectue la même démarche pour le repose pied que pour le premier maenianum. Les les deuxièmes et troisième maenianum, les traces présentes sur le mur des basiliques indiques que les escalier étaient en bordure de gradin. Les marches alignées avec les *parodos* sont donc creusées en utilisant une copie de la forme de base décalée de 3,6m sur l'axe Y. On utilise un **modifieur "Mirror"** pour les rendre symétrique par rapport au centre de la cavea. Une fois les modifliers appliques sur les maenianum et le maillage fermé, on peut soustraire les

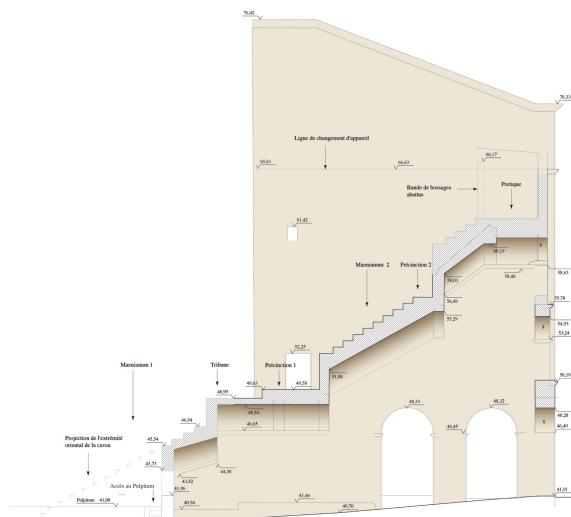
marches d'escaliers à l'aide d'un **modifier "Boolean"**. On soustrait également une marche sur chaque précinctio de l'objet *cavea*. Le premier maenianum est également percé tout comme la *cavea* au niveau de l'entrée menant au dixième gradin.

2.4 Aditus

Les aditus sont en réalité une extension de la *cavea* qui se prolonge de manière rectiligne sur l'axe y (sud-nord à peu près). Il est important pour le modèle numérique qu'il y ait jonction entre l'objet "*cavea*" et les objets "*aditus*" en tout cas sur la partie commune c'est à dire partout excepté au niveau de la tribune et des **parodos**. Or les relevés (voir figure 2.4a et 2.4b) stipulent des mesures qui diffèrent d'un aditus à l'autre et également par rapport à la *cavea* théorique (figure 2.1).



(a) Coupe sur l'**aditus** occidental [BADIE et collab., 2013a, Pl. XLVIII]



(b) Coupe sur l'**aditus** oriental [BADIE et collab., 2013a, Pl. XLIX]

L'intérieur des aditus est composé d'un enchainement de voûtes en berceau permettant le passage sous la *cavea*. Les mesures de ces voûtes sont données par la figure 2.4a pour l'aditus occidental et la figure 2.4b pour l'aditus oriental. Un objet à l'est et un objet à l'ouest épousant la forme de ces voûtes sont créés par extrusions successives et sont retirés des objets "*aditus*" par **modifier "Boolean"**. Leur largeur est de 1,52m d'après [BADIE et collab., 2013a, Pl. XXI] et en appliquant la règle 1. Les aditus sont dans un premier temps symétrisés à l'identique à l'est et à l'ouest par recopie via un **modifier "Mirror"**. Ils sont modélisés à partir de l'objet *cavea* que l'on coupe à partir du dixième gradin pour laisser l'espace aux **parodos**. Le plan de coupe prend ensuite une épaisseur de 3,6m grâce à un **modifier "Solidify"**. Il est important de noter que tant qu'un modifier n'est pas appliqué, il est toujours possible de le masquer ou de le modifier. A la différence du **modifier "Screw"**, le **modifier "Solidify"** permet l'utilisation du **modifier "Boolean"** sans avoir besoin de l'appliquer définitivement. Cela laisse une grande flexibilité quand à la modifiabilité du modèle. Les aditus sont également percés par la porte (symétrisée en miroir) donnant accès au dixième gradin déjà évoqué à la section 2.2 ainsi que par deux grandes baies à arcature donnant dans les basiliques. Les figures 2.4a et 2.4b en donnent les élévations tandis que leur largeur est donnée par A.Caristie du côté occidental. Celles-ci seront réutilisées du côté oriental.

2.5 Le mur de scène et ses basiliques

Le mur de scène ainsi que ses deux basiliques constituent un bloc distinct. La base est entièrement créée grâce aux cotes de la figure A.1. La première étape est de tracé du segment de deux points aux coordonnées suivantes [-51,96; 21,92; 40] et [51,96; 21,92; 40] correspondant aux extrémités nord de la base du mur. On extrude alors ces points selon les axes X et Y afin de tracer la forme extérieure du mur. La seule partie qui n'est pas alignée sur l'un de ces deux axes est l'[exedre](#) curviligne enclavant la porte royale. Celle-ci est modélisé à partir d'un cercle de 23,5m de diamètre pour lequel on ne garde que six segments à gauche et sept à droite qui forme la partie incurvée du mur. Une fois le contour de la base réalisé, le plan ainsi créé est extrudé verticalement jusqu'à 76,42m correspondant à la plus haute élévation du mur. Sont ensuite créés des objets rectangulaires aux dimensions des pièces, et traversant le mur dans toute sa hauteur. A l'aide d'un [modifier "Boolean"](#) ces objets sont soustraits à la forme de base. On note quelques valeurs aberrantes sur le plan de [BADIE et collab., 2013a, Pl. XXI] surement dues à des erreurs de recopie et qui sont à présent corrigées dans le modèle numérique. Lorsqu'une cote n'a pas été spécifiée, on considère la cote symétrique du mur.

La même méthode est utilisée pour découper le haut du mur qui supportait le toit. On s'appuie alors sur la restitution de A.Caristie (voir figures 1.6a et 1.6b) qui propose pour la partie sommitale du front de scène une taille en biseau permettant de soutenir les poutres allant des trous d'encastrement dans le mur nord à l'avant de la scène. On creuse donc également la façade sud du mur nord avec un objet de forme rectangulaire représentant une poutre basique et qui formera ces trous d'encastrement. Celle-ci est taillée pour entrer perpendiculairement dans le mur et on adopte le modèle générique [BADIE et collab., 2013a, Pl. XL]. Ces poutres sont répétées à l'identiques à l'aide d'un [modifier "Array"](#) car ces encastrements ont été détruit et reconstruit par endroit ce qui rend la restitution très difficile (voir [BADIE et collab., 2013a, Pl. XXXVII]). Cela n'empêche pas les futurs améliorations par des archéologues experts dans une prochaine étape.

Pour réaliser les 17 portes donnant sur la [Porticus post scaenam](#) on utilise également le plan A.1 en réalisant une mise à l'échelle lorsque les valeurs numériques de largeur ne sont pas indiquées. La modélisation de leurs élévations n'est malheureusement pas très précise car faute de valeur numérique, celles-ci sont estimées grâce aux dessins de H.Daumet [BADIE et collab., 2013a, Pl. XII, XIII, XIV]. Ce travail révèle que la porte royale n'est pas parfaitement centrée par rapport à la cavea mais est décalée de 32cm vers l'est. Ceci est peut-être dû à la façon dont a été conçu le modèle numérique et par la présence des nombreuses approximations stipulées plus haut.

La façade du front de scène possède elle aussi des trous d'encastrement ayant pour leur part servis à accrocher la décoration. Ceux-ci sont créés à l'aide d'un [modifier "Boolean"](#) en respectant les mesures d'élévation de [BADIE et collab., 2013a, Pl. XXIX]. Sur cette même façade sont également percées les trois portes traversant le [postscaenium](#) ainsi que différents autres encastrement. Tous sont modélisés par mise à l'échelle des plans de BADIE et collab. [2013a] et sont symétrisés par rapport à la porte royale. De part et d'autre de celle-ci se trouvent deux niches créées par la soustraction d'un demi-cylindre verticale. Au-dessus, à la frontière avec le second ordre se trouvent de petites baies à arcature. Encore au dessus et centré sur le front de scène se trouve une grande niche abritant aujourd'hui une statue dite d'Auguste. Cette niche est l'emprunte d'un demi-cylindre vertical dont la face supérieur est un demi-cylindre horizontal.

2.6 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 **BADIE et collab.** [2013a] 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'hyposcaenium et le caniveau décrit dans une autre partie.

2.7 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 (fig. 2.5) à partir de la plus basse jusqu'à la plus haute par pas de 6m par extrusion successive. Les élévation ont ensuite été légèrement adaptée (ligne par ligne) pour s'encastrer 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.



FIGURE 2.5 – Plan topographique de la colline Saint-Eutrope [BADIE et collab., 2013b, p.11]

Chapitre 3

Propositions de reconstitution

« Imagination is as effortless as perception, unless we think it might be ‘wrong’, which is what our education encourages us to believe. »

Keith Johnstone

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.
- 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.
- BADIE, A., J.-C. MORETTI et D. TARDY. 2007, «Pouvoir du théâtre et théâtre du pouvoir. nouvelles recherches sur le théâtre d'orange», *Archéopages*.
- FORMIGÉ, J. 1923, *Remarques diverses sur les théâtres romains, à propos de ceux d'Arles et d'Orange, Sujets Sujets divers d'érudition*, vol. 13, Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des inscriptions et belles-lettres de l'Institut de France.
- MORETTI, J.-C. 1993, *Étude sur la nomenclature grecque de l'architecture théâtrale. ΠΙΤΑΣΟΣ et la dénomination grecque des vélums*, vol. 2, Anatolia Antiqua.
- PLINE. 77, *Naturalis historia*, vol. XIX.
- ROUMÉGOU, 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.
- VITRUVE. -15, *De Architectura*, vol. V.

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 impulsional

5.6 Méthode d'octree

5.7 Vue d'ensemble

Add-on blender, traitement du signal, etc

Chapitre 6

Validation

« *Areuh* »

Iilde 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 sur le théâtre d'Orange

« *Don't stop me now
I'm having such a good time, I'm
having a ball
Don't stop me now
If you wanna have a good time just
give me a call
Don't stop me now
'Cause I'm having a good time
Don't stop me now
Yes I'm havin' a good time
I don't want to stop at all* »

Queen

Sommaire

4.1	Introduction à l'acoustique de salle	30
4.2	Méthodes de calcul acoustique	30
4.2.1	FEM/BEM	30
4.2.2	RayTracing	30
4.2.3	Sources-image	30
4.2.4	Statistique	30
4.3	Méthode couplée	30

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

Chapitre 8

Comparaison avec d'autres théâtres antiques

« »

Sommaire

5.1	Introduction	32
5.2	Lecture de maillage	32
5.3	Calcul de rayon	32
5.4	Calcul de sources-images	32
5.5	Génération de réponse impulsional	32
5.6	Méthode d'octree	32
5.7	Vue d'ensemble	32

Conclusion

Références

Annexe A

Annexes

A.1 Figures annexes

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer 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, consectetuer 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 (??). Pour plus de détails, voir page ??.

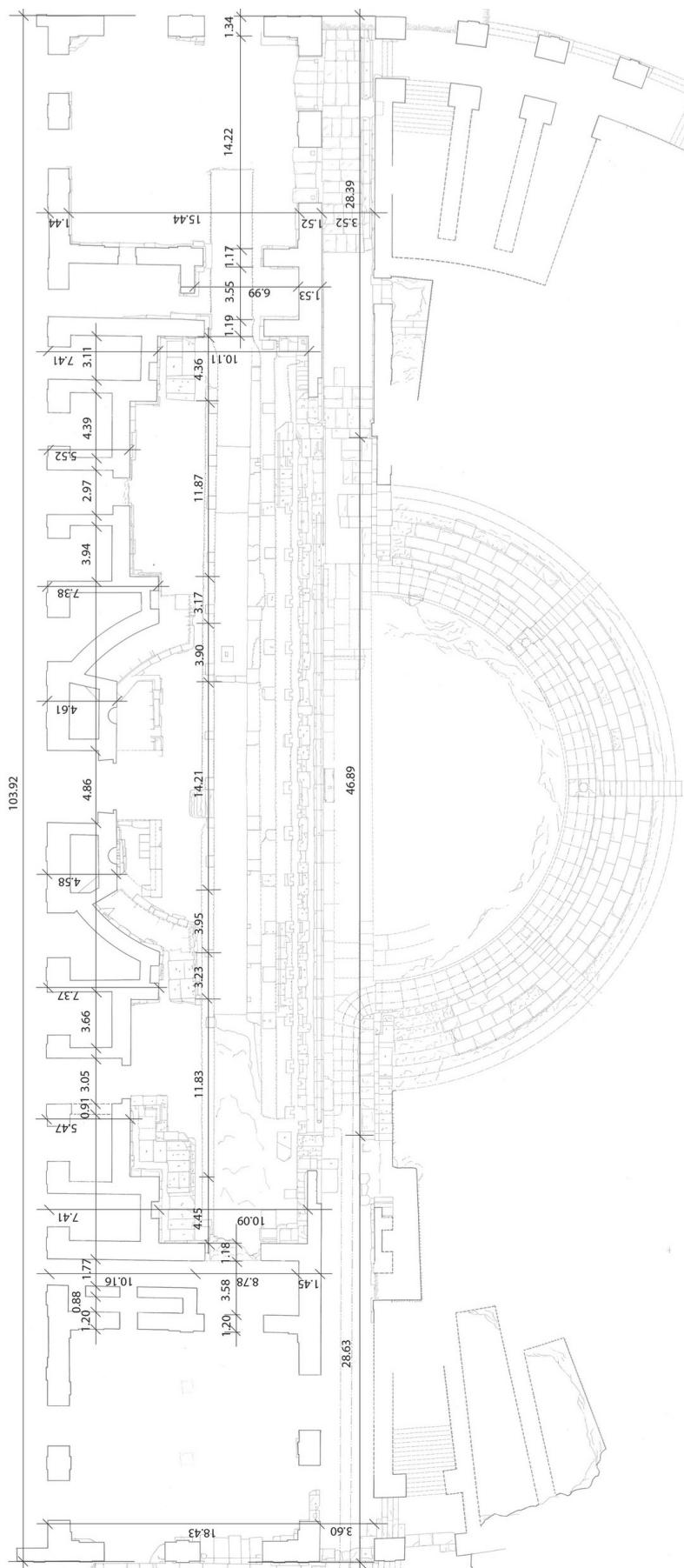


FIGURE A.1 – Plan du rez-de-chaussée au bâtiment de scène [?, Pl. XXI]

A.2 Tableaux annexes

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer 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, consectetuer 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

CAO Conception assistée par ordinateur. [18](#)

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

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

IRAA Institut de recherche sur l'architecture antique. [6, 8, 13, 14](#)

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

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

Annexe C

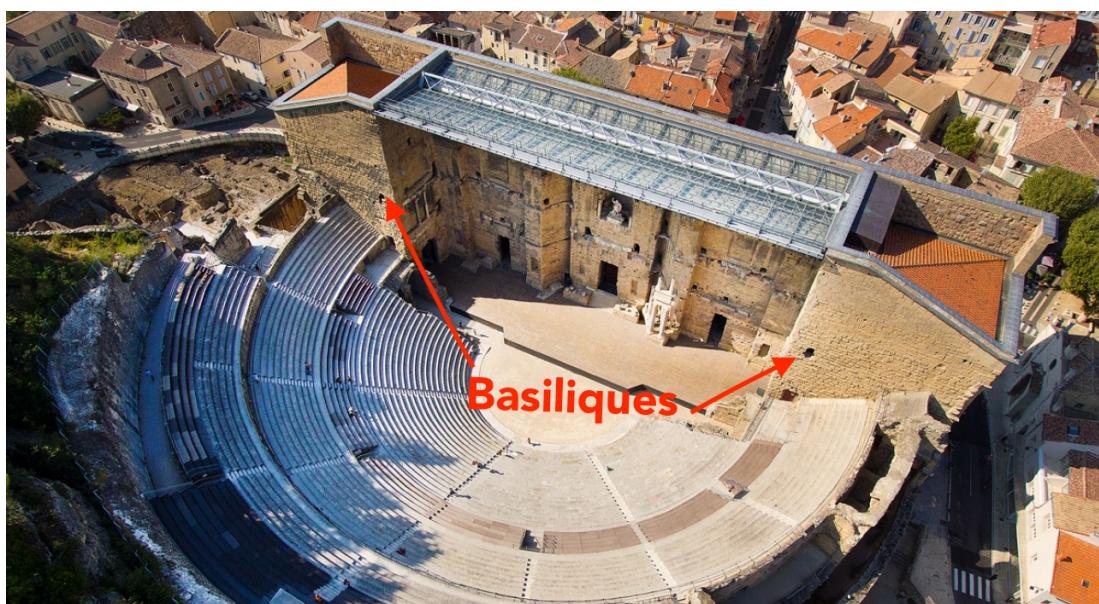
Glossaire

ADITUS Portes conduisant de l'extérieur à l'**Orchestra**. [vii, 7, 10, 11, 21, 22, 25, 26, VI](#)

AMBULACRE Galerie circulaire permettant de se déplacer sur la **cavea**. [11, 12, 22](#)

ARÊTIER Pièce de charpente ou d'étencheité qui forme l'angle saillant ou l'arête de la croupe d'un toit. [13](#)

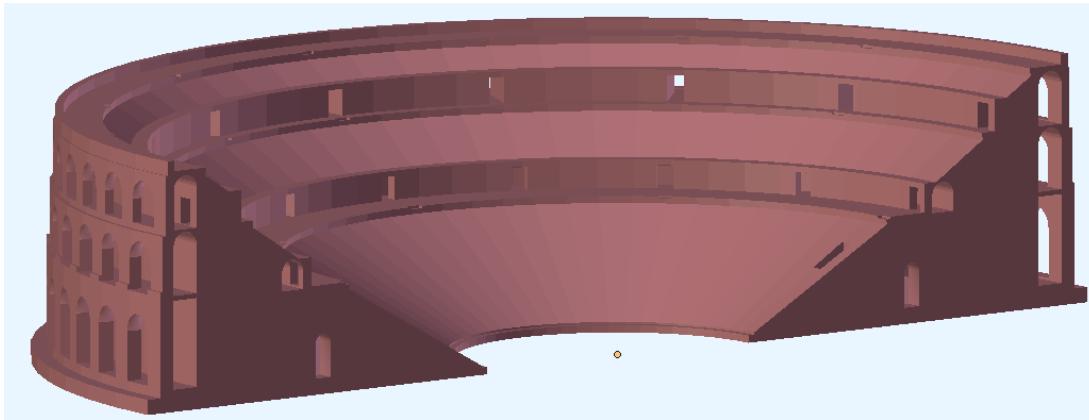
BASILIQUE Large pièce de forme quasi-carré qui flanque le mur de scène et les **parascae-nium**



. [vii, 7–9, 11, 13, 14, 19, VI](#)

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**. [10](#)

CAVEA Désigne l'ensemble des rangées concentriques composant les gradins



. vii, ix, 5, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 19–21, V–VII

CONSOLE Pièce de maçonnerie servant à supporter les mâts du *velum*. 9, 15

CUNEUS Groupe de gradins représentant une portion de la *cavea*. 10, 11, 25

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

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. 10, 11, 19, 21, 25, VI, VII

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 subit une rotation. Cela est utilisé par exemple pour répéter les colonnes de la *Porticus in summa cavea*.. 21, 25

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.. 21, 26

MODIFIER "SCREW" 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. 21, 25

MODIFIER "SOLIDIFY" 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*. 25

ODÉON Petit théâtre couvert dédié exclusivement aux spectacles musicaux. 8

Orchestra Espace semi-circulaire (chez les romains) ou circulaire (chez les Grecs) se situant entre la scène et le premier gradin. vii, 7, 10, 15, 19, V, VI

PARASCAENIUM Espace intermédiaire entre la scène et les *basiliques* comportant des escaliers pour atteindre les niveaux supérieurs. 7, 9, 13, 14, V

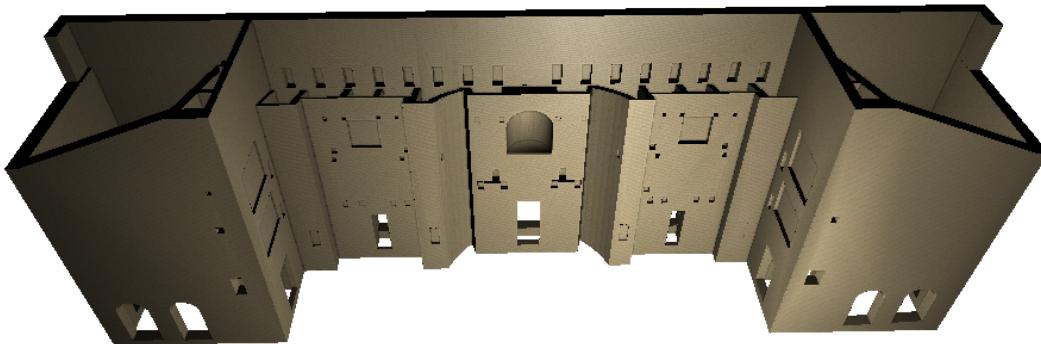
PARODOS Entrée menant à l'**Orchestra** traversant les **aditus**. [ix](#), [10](#), [11](#), [24](#), [25](#)

PODIUM Massif de maçonnerie élevé au-dessus du sol et servant de soubassement. [10](#), [VI](#)

Porticus in summa cavea Arcade bordée de colonnes située au dessus du troisième **maenianum**. [11](#), [13](#), [15](#), [VI](#)

Porticus post scaenam Arcade bordée de colonnes située à l'extérieur du théâtre et adossée au mur de scène. [8](#), [9](#)

POSTSCAENIUM Mur séparant la scène de l'extérieur comportant des salles pouvant servir de coulisses



. [vii](#), [5](#), [7–9](#), [14](#)

PRECINCTION Palier (aussi appelé *diazoma* chez les grecs) situé au-dessus de chaque **maenianum** et sur lequel s'ouvre les **Vomitorium**. [10](#), [11](#), [13](#), [21](#)

Pulpitum Ensemble de l'estrade sur lequel jouent les acteurs orné en son front par un petit mur de marbre décoré. [vii](#), [7](#), [8](#), [10](#), [14](#)

VELUM Grande pièce de tissu généralement en lin tirée au dessus de la **cavea** pour protéger les spectateurs du soleil. [8](#), [9](#), [13](#), [15](#), [16](#), [V](#)

Vomitorium Issues permettant aux spectateurs d'accéder aux gradins. [11](#), [21](#), [VII](#)

Annexe D

Liste des symboles

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

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