

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

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	14
2 Modélisation	17
2.1 Introduction	18
2.2 Méthodologie	19
2.3 La cavea et ses substructures	21
2.4 Les maenianum	25
2.5 Les aditus et les tribunes	27
2.6 Le mur de scène et ses basiliques	28
2.7 Le pulpitum et l'orchestra	30
2.8 Les couvertures du bâtiment de scène et les circulations internes	30
2.9 La porticus in summa cavea	31
2.10 Les escaliers	32
2.11 Les rambardes et le balteus	33
2.12 La colline Saint-Eutrope	33
3 Applications	35
3.1 Le velum	36
3.2 Le rideau de scène	37
3.3 Les système de particules	37
3.4 Texturing	38
3.5 Autres projets ayant utilisés le modèle	38
Conclusion	39
Références	42
II Calculs acoustiques	37
Introduction	39

4 Acoustique de salle	41
4.1 Introduction à l'acoustique de salle	42
4.2 Méthodes de calcul acoustique	42
4.3 Méthode couplée	42
5 Logiciel développé	43
5.1 Introduction	44
5.2 Lecture de maillage	44
5.3 Calcul de rayon	44
5.4 Calcul de sources-images	44
5.5 Génération de réponse impulsuel	44
5.6 Méthode d'octree	44
5.7 Vue d'ensemble	44
6 Validation	45
6.1 Introduction	46
6.2 Comparaison aux cas test	46
6.3 Analyse de complexité	46
Conclusion	47
Références	49
III Analyse acoustique du théâtre d'Orange	51
Introduction	53
7 Configuration initiale	55
7.1 Configuration du maillage	56
7.2 Les matériaux	56
7.3 RIR du théâtre d'Orange	56
8 Test de configurations	57
8.1 position des spectateurs	58
8.2 Présence de spectateurs	58
8.3 Présence de velum	58
8.4 Forme et matériaux du toit	58
9 Comparaison avec d'autres théâtres antiques	59
Conclusion	61
Références	63
A Annexes	I
A.1 Figures annexes	I
A.2 Tableaux annexes	VIII
B Liste des acronymes	IX
C Glossaire	XI

D Liste des symboles

XV

TABLE DES MATIÈRES

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	Modélisation de la cavea	22
2.2	Parodos oriental et entrée menant à l' <i>ima cavea</i>	24
2.3	Modélisation de la cavea	25
2.5	Modélisation de l'aditus occidental et de sa tribune	27
2.6	Modélisation du postscaenium et de ses basiliques	28
A.1	Coupe théorique sur la cavea	I
A.2	Vue de dessus par A. Caristie 1856	II
A.3	Plan du rez-de-chaussée au bâtiment de scène	III
A.5	Elévation du front de scène	IV
A.6	Elévation du retour du mur de scène	V
A.7	Elévation de la partie sommitale de la basilique occidentale	VI
A.8	Plan topographique de la colline Saint-Eutrope	VII

Liste des tableaux

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 seuls 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 colonisations 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 construits 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 endroits 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 déjà 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 A.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 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 mondiale de l'UNESCO et quelques années plus tard d'autres constructions modernes telle 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 ayant permis de créer un modèle numérique compilant une grande partie des informations architecturales du théâtre dans sa version d'origine. Nous expliquerons d'où proviennent ces diverses informations, quel crédit nous pouvons leur accorder et les problèmes soulevés par ce travail. Nous remettrons en question certaines hypothèses des ayant étudier ce monument précédemment et choisirons d'en modéliser certaines afin d'en déterminer la vraisemblance. Nous finirons par exposer quelques applications et tests visuels qui ont été permis par l'existence du modèle numérique.



(a) Vue de la scène avant le déblaiement par A. (b) Vue intérieure du théâtre, par Asselineau, Caristie, 1856 (cliché Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Charenton)

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, les basiliques et le pulpitum	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	16

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 des architectes Caristie et Daumet et permettent d'avoir un état des lieux 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 bâti 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](#) qui étaient entièrement couverts, seul un [velum](#) couvrait l'espace réservé aux spectateurs. Collé au flan est au théâtre se trouvent les ruines d'un sanctuaire du culte impérial qui ne fait pas partie de l'étude. De même, la façade nord était prolongée par une grande [porticus post scaenam](#) qui n'a pas été modélisée mais qui pourra l'être dans une étude postérieure.

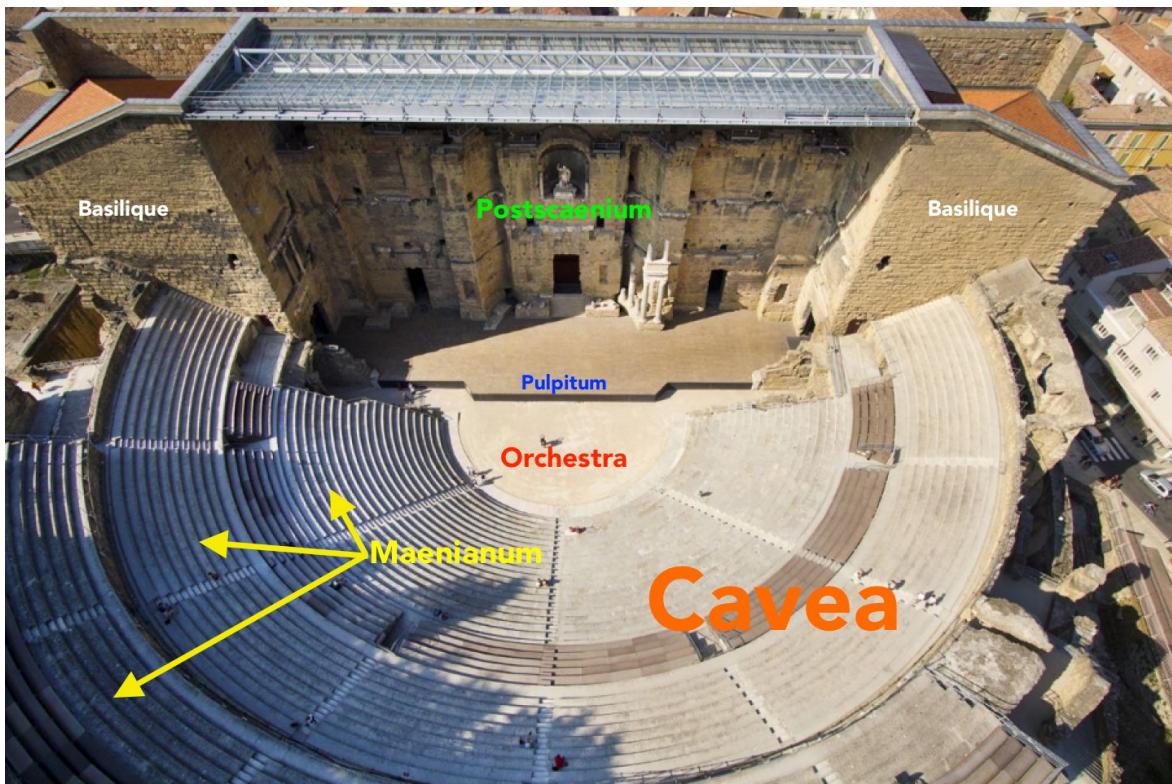


FIGURE 1.1 – Vue d'ensemble du théâtre d'Orange (cliché de Boudereaux sur [choregies.fr](#))

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' page 53). Les côtés est et ouest donnaient sur des rues, alors qu'adossée à la façade nord se trouvait une **porticus post scaenam** large d'environ neuf mètres. Celle-ci donnait 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 les mâts de maintien du **velum**. 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 de **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 donc que les mâts n'aient été présents qu'à ces emplacements, c'est à dire au niveau des **basiliques**. L'absence de mât au niveau du mur de scène pourrait s'expliquer par le fait que la trop forte tension liée au poids du **velum** aurait été trop importante pour un mur rectiligne de cette longueur et cette épaisseur. La forme carrée des basiliques permet une plus grande résistance à la tension. 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 coulisses pour l'habillage des acteurs ou le stockage des décors et des 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 à des escaliers permettant de monter aux étages supérieurs via les **parascaenium**. 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 **postscaenium**. Cela permettait aux acteurs d'accéder à des niches traversantes en hauteur pour faire apparaître sur le front de scène des personnages divins ou effectuer des bruits de tonnerre par exemple.

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 partiellement caché par des ornements en marbre. On y trouve plusieurs niches de diverses profondeurs ainsi que les traces d'encastrement du placage de marbre qui servent aujourd'hui 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 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 de façade 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'autre de deux **basiliques** de forme presque carrée auxquelles on accède depuis la scène en traversant un **parascaenium**. Celui-ci communique avec la basilique via une porte arquée et à la scène par

une une grande porte rectangulaire. **parascaenium** comporte une cage d'escaliers 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 coulisses 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.

La scène ou **pulpitum** était une structure en bois d'une largeur de 61m et d'une profondeur de 10m qui 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 où elle y accueillait le chœur, elle ne sert plus aux représentations chez les romains et certains spectateurs de marque pouvaient s'y installer. Aujourd'hui recouverte de graviers compact elle pouvait être à l'époque dallée de marbre ou pavée de pierres colorées. L'**orchestra** était limitée 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**. Chacun est composé d'une succession de trois voûtes en décrochement qui portaient les extrémités de la **cavea** et les tribunes. Ces dernières, considérées comme des places d'honneur, étaient souvent décorées de sculpture comme à Dougga ou à Herculanum et étaient accessibles 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**, séparés l'un de l'autre par une **précinction** et un **podium**. Cela a été déduit par A. Caristie grâce au profil des **aditus** et aux vestiges des substructures. C'est donc en ce sens que la **cavea** fut reconstruit par Formigé. Chaque **maenianum** est divisé par des escaliers en un certains nombre de sections appelées **cuneus**. Ainsi, la forme de la **cavea** ne suit pas les

tracés de **VITRUVÉ** [-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 dégagés pendant les fouilles. Il comprend un repose-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 **précinctio** 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 (voir 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 **précinctios** étaient généralement bordés de balustrades souvent ornées de sculptures.

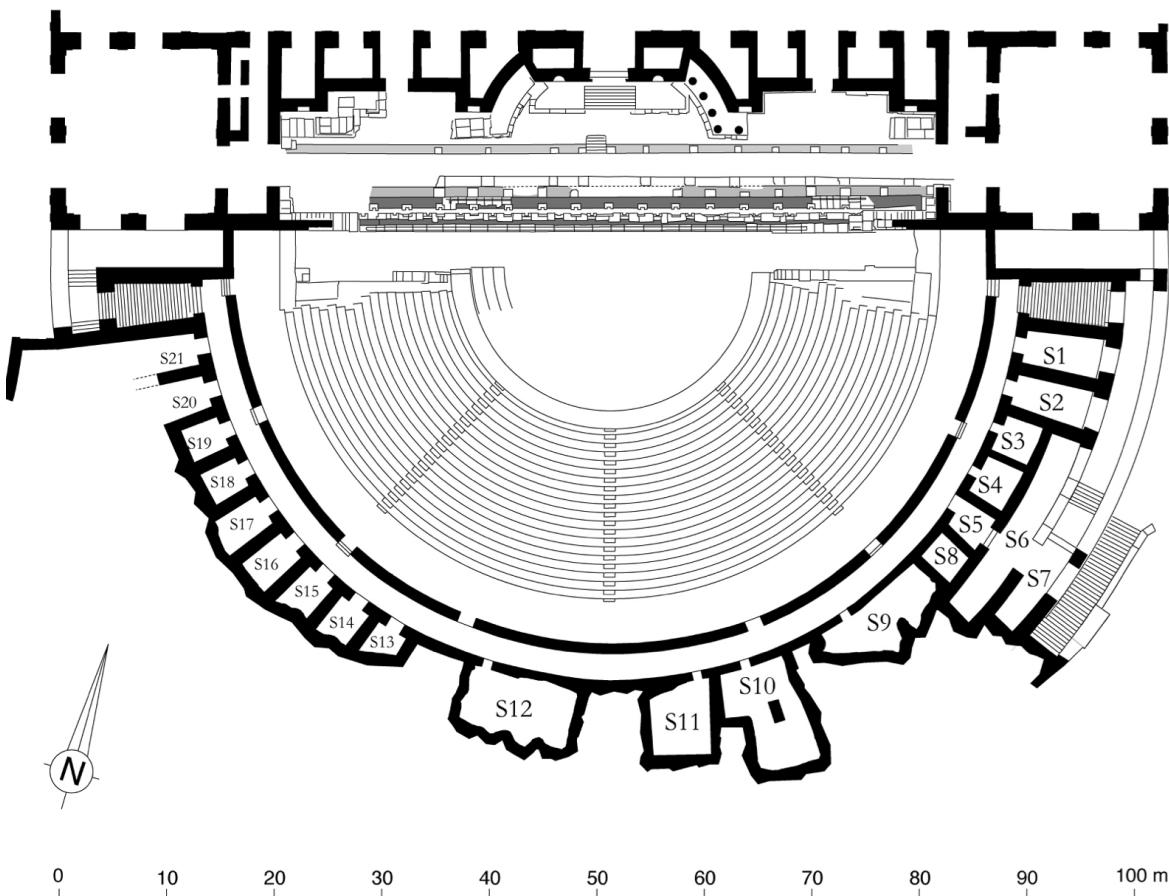


FIGURE 1.2 – Plan du théâtre au niveau du premier ambulacre [BADIE et collab., 2013a, Pl. XVII]

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 a été restauré pour former neuf gradins divisés en huit **cuneus** par neuf escaliers ce qui semble être un choix acceptable en comparaison aux autres bâtiments du même type. Par ailleurs A.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.

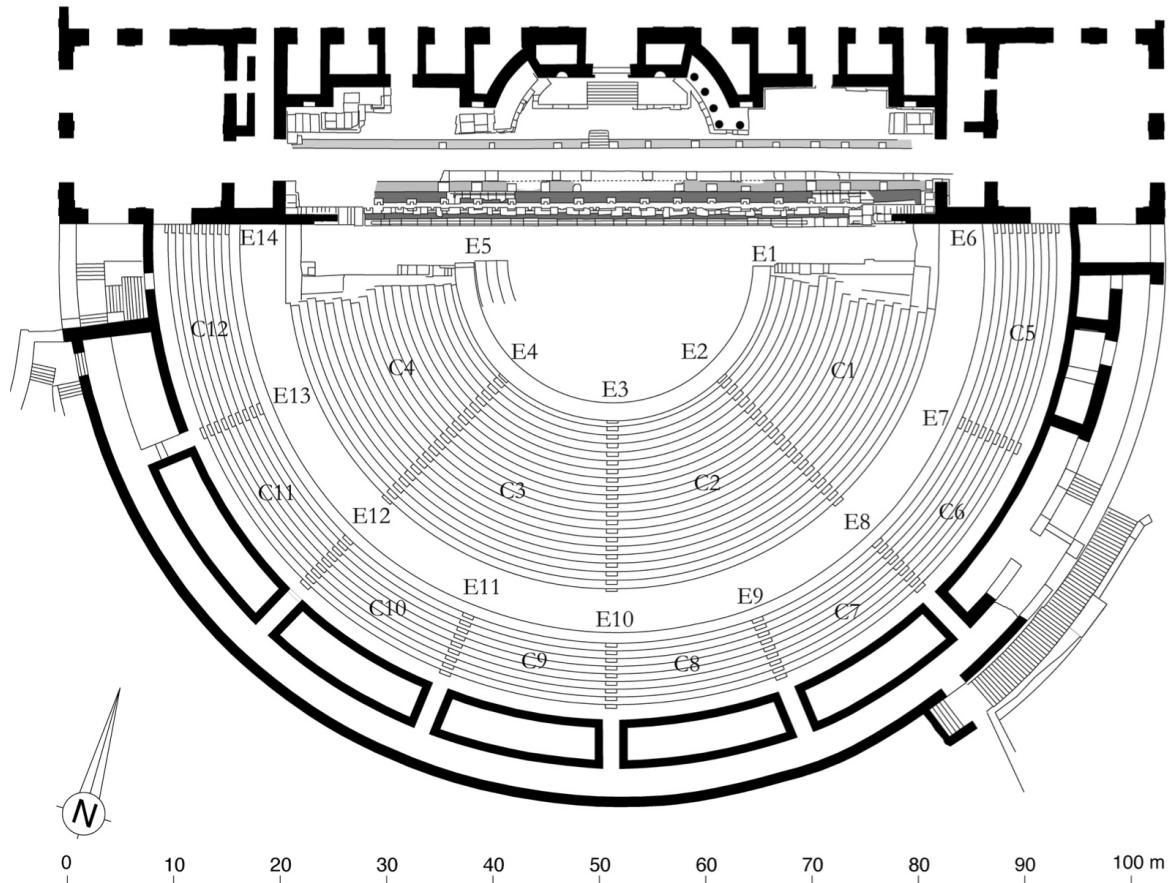


FIGURE 1.3 – Plan du théâtre au niveau du second **ambulacre** [BADIE et collab., 2013a, Pl. XVIII]

Le troisième **maenianum**, ou *summa cavea*, comporte cinq gradins divisés également par neuf escaliers. On constate que la largeur des gradins diminue lorsqu'on s'élève, ainsi, ils ne mesurent plus que 72cm en moyenne sur le troisième **maenianum** ce qui a pour effet d'augmenter la pente et d'améliorer la visibilité des derniers rangs. Il était jadis couonné 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 n'ai été accessible que par les machiniste du **velum FORMIGÉ** [1923]. On trouve aujourd'hui des gradins sur échafaudages à cet emplacement de même que sur les deux premières **précinctions**. Une rue périphérique enclave 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.

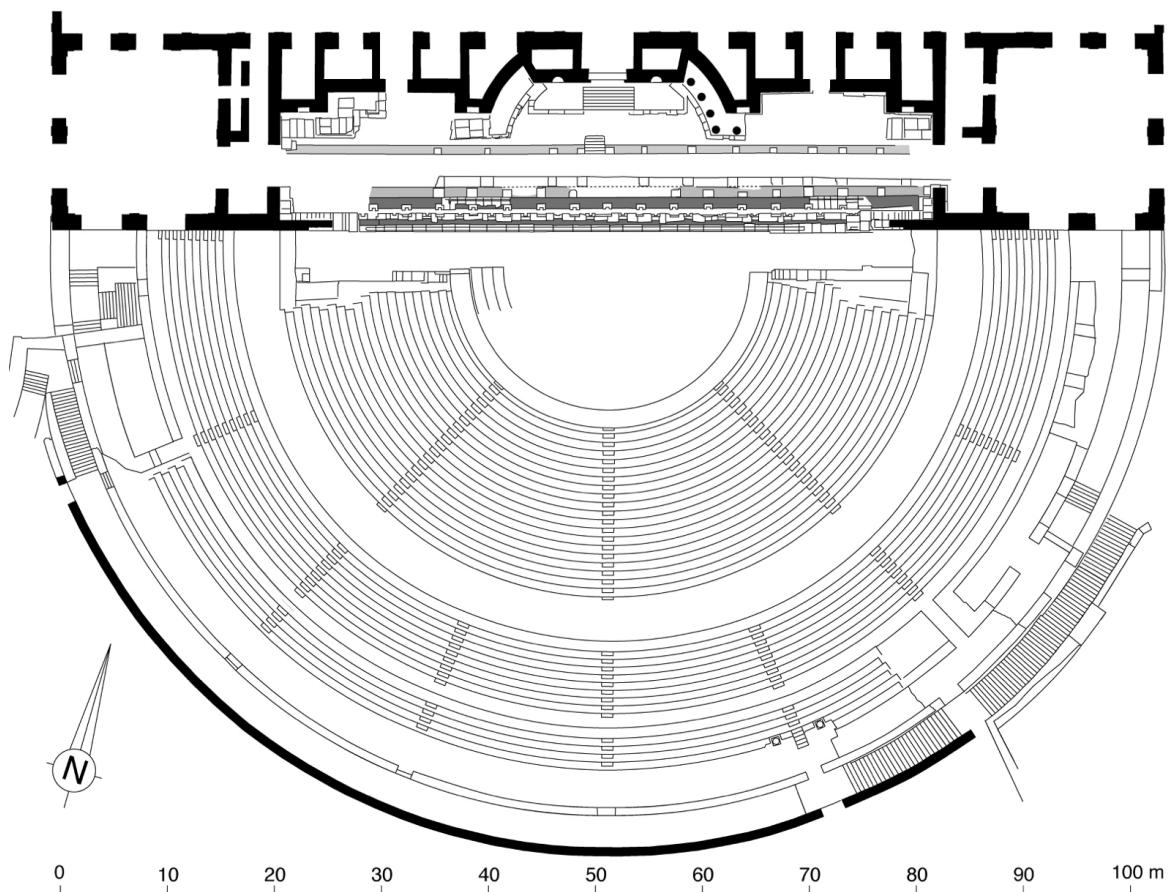


FIGURE 1.4 – Plan du théâtre au niveau de la rue périphérique [BADIE et collab., 2013a, Pl. XIX]

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 à 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.

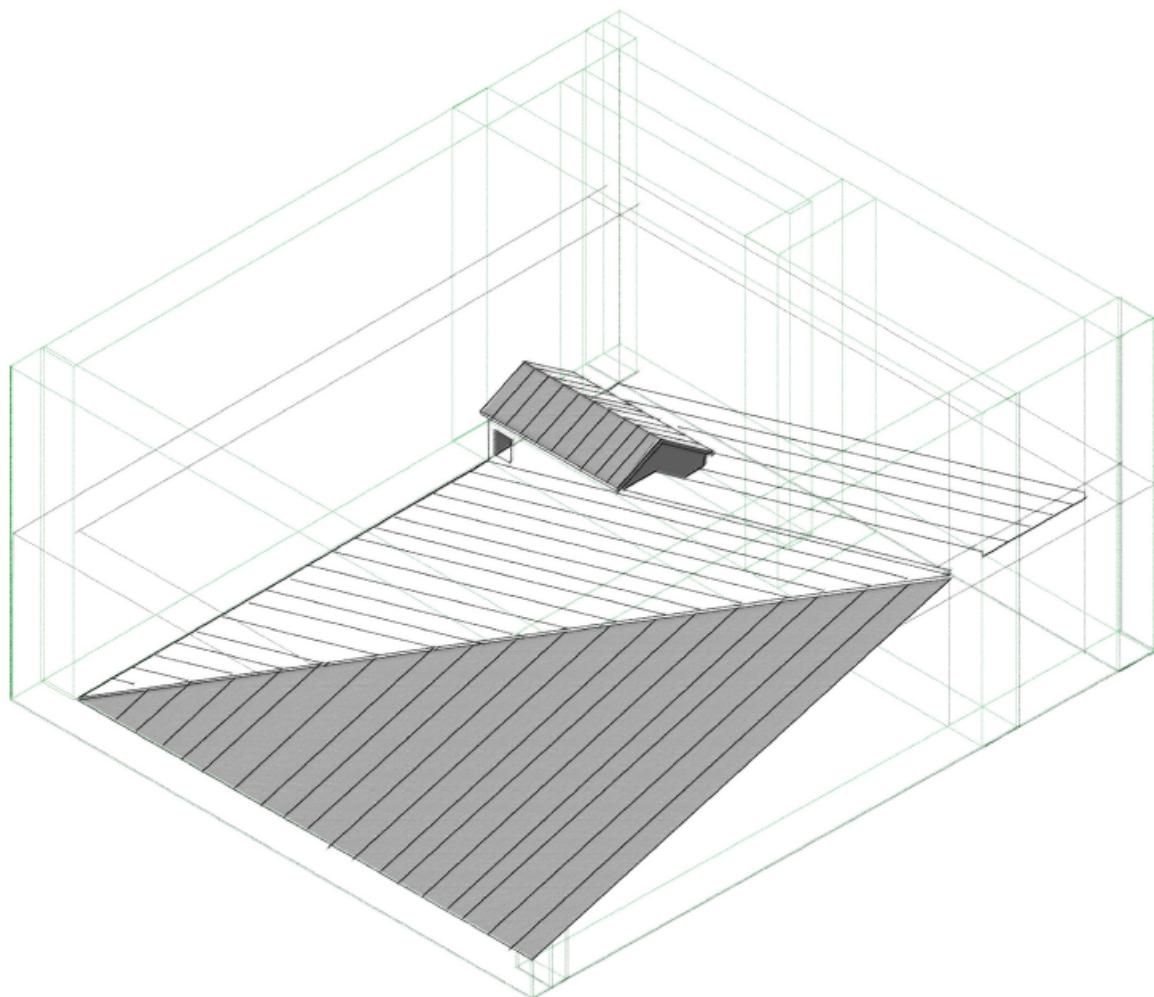
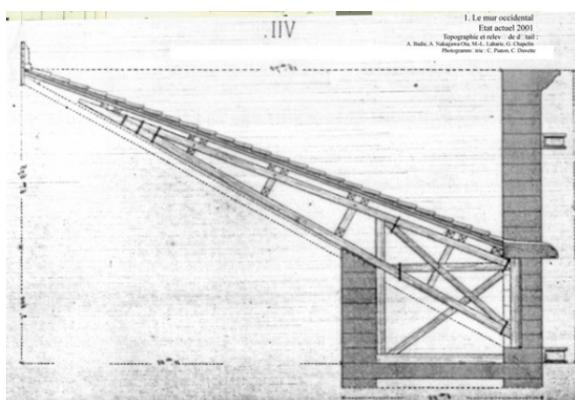


FIGURE 1.5 – Proposition de restitution des toitures de la **basilique** occidentale, de la cage d’escalier et du **parascaenium** [BADIE et collab., 2013a, Pl. XLVII]

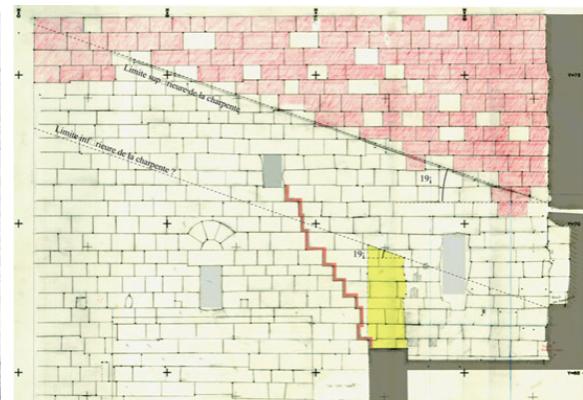
1.4.2 La couverture du postscaenium et du pulpitum

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 part son anachronisme. La version antique n'a laissé aucun vertige en elle-même car elle devait être faite en matériaux périssables et semble avoir subit un ou plusieurs incendies au cours de son histoire. 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 (voir 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 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 pourra ainsi permettre d'en 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 protégés du soleil et se déployait probablement partiellement en suivant le dépla-

cement 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 (voir section 1.2) 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 anneau situé au dessus de l'*orchestra* auquel sont attachés les cordages qui permettent 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 premier 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 coté de ceux-ci on trouve de plus petits trous probablement utilisés pour fixer les cordes. Cette particularité a peu été observée par ailleurs et pourrait être due 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). Nous verrons dans la section 3.1 que ce chiffre ne coïncide pas avec ses autres dessins.

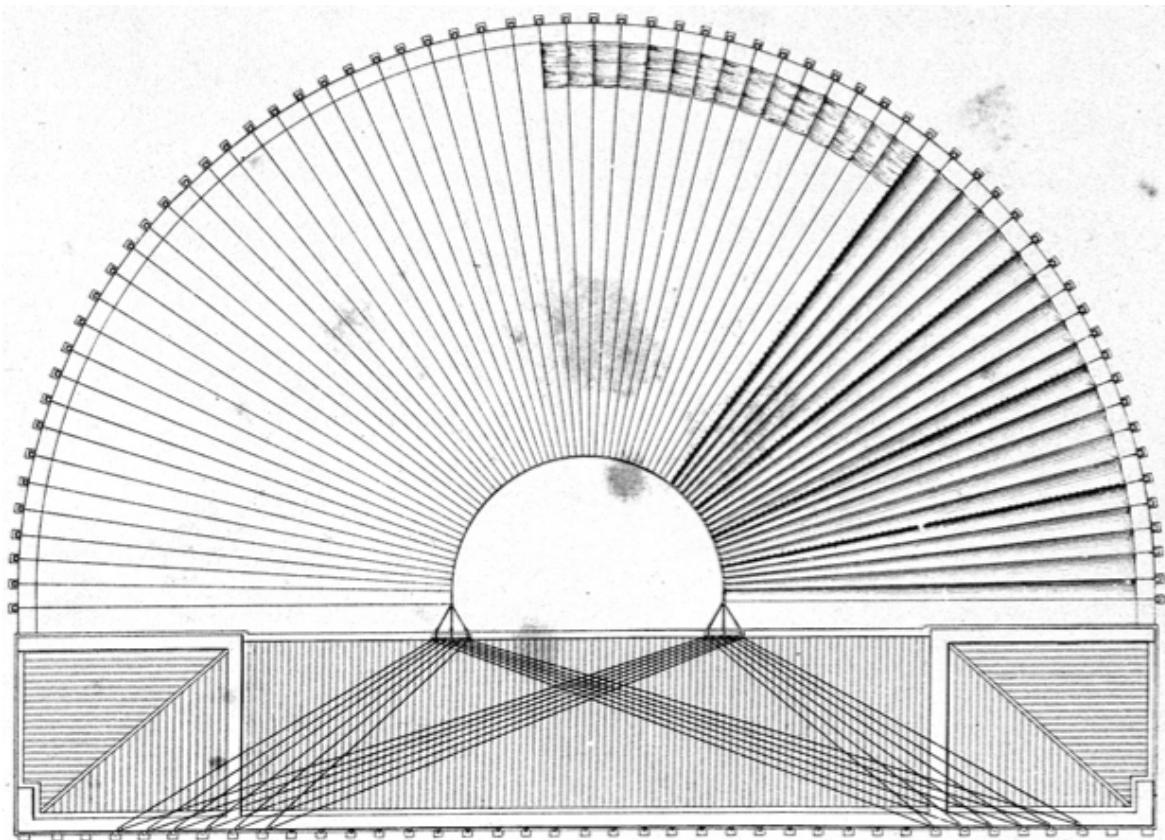


FIGURE 1.7 – Proposition de restitution du velum d'Orange par A. Caristie

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	La cavea et ses substructures	19
2.3	Les maenianum	22
2.4	Les aditus et les tribunes	24
2.5	Le mur de scène et ses basiliques	25
2.6	Le podium et l'orchestra	27
2.7	La colline Saint-Eutrope	27

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 maquettes 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 la technologie numérique apporte au chercheur un nouveau champs d'observation et de nouveaux outils de travail. *"En effet, il est clair que si les modèles 3D étaient à l'origine de simples outils d'aide à la visualisation et à la diffusion de contenu scientifique au grand public, le processus de modélisation tridimensionnelle doit maintenant être considéré comme une méthode qui offre la possibilité de faire de nouvelles découvertes."* ROCHELEAU [2010].

Premièrement, un modèle numérique permet d'archiver la quasi totalité des informations en un document unique. Le mode d'affichage que l'on choisira pourra être adapté à la cible de la présentation. *"L'image n'est qu'un élément d'un discours qui doit, dans son ensemble, être pertinent vis-à-vis du public auquel il s'adresse."* GOLVIN [2005]. On peut donc par exemple observer un monument par vue du dessus avec ses cotes et en étudier ainsi le plan topographique 2D correspondant. Mais on peut également réaliser une impression 3D de l'objet pour en avoir une maquette physique à l'échelle réduite. Cependant *"la maquette électronique répond à l'une des critiques qui avaient été adressées aux maquettes rigides; elle est capable de montrer les documents, les arguments, les hypothèses sur lesquels la restitution architecturale s'est fondée."* (GOLVIN [2005]) ce qui lui confère une force supplémentaire. Par ailleurs, la précision et la qualité des documents est largement renforcée par la manipulabilité des modèles numériques. La précision est alors celle des ordinateurs, soit, moins de 10^{-4} dans le pire des cas WIKIPÉDIA [2017].

Deuxièmement, un modèle numérique 3D peut être utilisé par des logiciels de calcul ou de simulation afin de tester des comportements physiques. On citera comme exemple les écoulements de fluide, l'ensoleillement ou la propagation d'ondes sonores. Il en est de même pour les questions architecturales d'agencement de décor ou de portance par exemple. Ce type d'outil 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 l'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. Cela apporte un point de vu immersif quasi inatteignable sans la technologie numérique.

Il existe bien entendu de nombreuses limites à la numérisation 3D car cette technique est relativement récente et beaucoup de développements 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 données 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 retranscrire le monument par des formes géométriques 3D plus ou moins complexes.

Dans ce chapitre nous allons présenter comment le théâtre antique d'Orange a été modélisé, 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, nous ferons un point sur la méthodologie entreprise durant le projet.

2.2 Méthodologie

Il existe de nombreux projets ayant pour objectif de virtualiser des monuments antiques. On citera par exemple le projet de virtualisation basé sur "le plan de Rome" de Paul Bigot, maquette de plâtre de $70m^2$ à l'échelle 1/400 représentant une partie de la Rome de Constantin (IV^e siècle après JC). Celui-ci est mené par le **Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle de l'Université de Caen (CIREVE)** depuis plus de dix ans et a pour but d'utiliser la réalité virtuelle comme outil de recherche archéologiques **FLEURY et MADELEINE [2007]**. Ce type d'étude commence toujours par un état des lieux bibliographique et le choix de la temporalité. Comme nous l'avons vu dans la section I, un monument de cette ancienneté subit de nombreuses transformations au cours de sa vie. Il est donc primordiale de situer dans le temps la représentation qui sera faite du bâtiment. Nous choisissons pour notre part de restituer le théâtre d'Orange dans son état au premier siècle de notre ère, c'est à dire dans ses toutes premières années de vie.

La deuxième étape de ce travail de modélisation est de choisir l'outil qui permettra de la réaliser. Comme indiqué en introduction de ce chapitre, nous utilisons la technique de **CAO** car nous avons besoin d'un maillage "léger" (notamment pour les simulations acoustiques de la deuxième partie du projet). Avec un monument comme le théâtre d'Orange on atteint déjà des dizaines de milliers d'éléments mais cela reste bien moindre que d'un nuage de points qui aurait constitué des millions d'éléments. Par ailleurs notre étude porte dans un premier temps sur les formes géométriques du théâtre sur lesquelles on pourra greffer par la suite des éléments plus précis réalisés par photogrammétrie. Ce fut d'ailleurs l'un des buts premier à l'initiative de ce projet de thèse. Il a notamment été numérisé en 2015 une partie des fragments de la frise dionysiaque retrouvés dans les décombres. La dernière raison qui nous pousse à modéliser le monument par **CAO** est que la photogrammétrisation du lieu aurait apporté beaucoup informations erronées pour la restitution du bâtiment dans son état d'origine. Effectivement, les restaurations ayant été conséquentes notamment sur la partie cavea et l'érosion ayant quelque peu dégradé les façades, la restitution aurait de toute façon du subir une large étude documentaire pour compléter le modèle. Par ailleurs une campagne de mesure par photogrammétrie ou lasergrammetrie est très longue et fastidieuse ce qui aurait retardé d'autant plus le projet. La technologie de **CAO** est largement répandue depuis une trentaine d'années et le nombre de logiciels permettant d'utiliser cette méthode est conséquent. Voici quelques exemple 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 ajoutées 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). Le "*game engine*" est le moteur de jeu permettant de se déplacer dans l'environnement avec un personnage ou bien en vue subjective. Néanmoins, ce point n'est pas bloquant car Blender peut exporter des modèles texturés dans Unity ou Unreal pour des visites virtuelles de très haute qualité.

Pour modéliser le théâtre, il faut d'abord le voir dans son ensemble pour pouvoir le situer dans son repère. Globalement, et comme tous les théâtres romain, le théâtre d'Orange a une enveloppe extérieure en forme de U fermé par un mur rectiligne. Sa cavea est construite à flanc de colline mais contrairement à la construction réelle du théâtre, celle-ci sera créée dans un deuxième temps.

On choisit de prendre l'axe axe X pour la direction sud-nord et l'axe Y pour la direction ouest-est. 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 l'axe Z portant les informations 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. Le modèle est réalisé à l'échelle 1 ce qui signifie que les cotations apparaissant sur blender sont les cotations réelles. Par ailleurs, certaines d'entre elles proviennent de relevés effectués sur le terrain et sont donc fidèles à ces valeurs au cm près. D'autres seront des valeurs moyennes, approchées ou bien calculées et cela sera bien entendu précisé. *"Le chercheur confronté au problème de la restitution d'un site est obligé de considérer trois types de données : les données connues, les données cachées, les données détruites."* ([GOLVIN \[2005\]](#)). Effectivement, le but de ce projet étant de restituer le théâtre dans sa version d'origine il faudra discriminer les données antiques de celles produites par la restauration de Formigé. Nous travaillerons également sur des éléments complètement disparus comme la [porticus in summa cavea](#) ou le velum uniquement à partir des hypothèses de restitutions des archéologues. Les différents éléments présentés dans ce document apparaissent dans l'ordre logique de leur modélisation.

Il est important de noter que la modélisation s'est faite par rapport à des documents et que ces sources peuvent être affichées en transparence sur Blender pour les superposer au modèle. On est ainsi capable d'observer le modèle selon différentes vues avec les plans

de référence ayant permis de le réaliser. On dispose alors du résultat ainsi que des sources dans un seul et même fichier.

2.3 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 A.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. Cette valeur est obtenue 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 cotes indiquées. Cependant plusieurs points posent difficulté. Premièrement les gradins sont représentés par des traits discontinus et sont donc hypothétiques. Leurs modélisations sont décrites dans la partie 2.4. Nous avons par contre besoin de connaître précisément l'espace qui leur est dédié afin de concevoir l'objet **cavea**. Nous obtenons ces valeurs en utilisant les quatre lignes de cotes 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 :

$$1,25 + 2,60 + 1,13 + 2,90 + 1,03 = 8,91m$$

et d'autre part :

$$0,35 + 0,92 + 2,59 + 4,83 = 8,69m$$

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 :

- La mesure qui a été faite a été mal reportée et le document présente une coquille.
- 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.
- La mesure est exacte mais les pierres s'étant érodées par endroit, on observe des fluctuations d'épaisseur qui n'étaient pas présentes à l'origine.

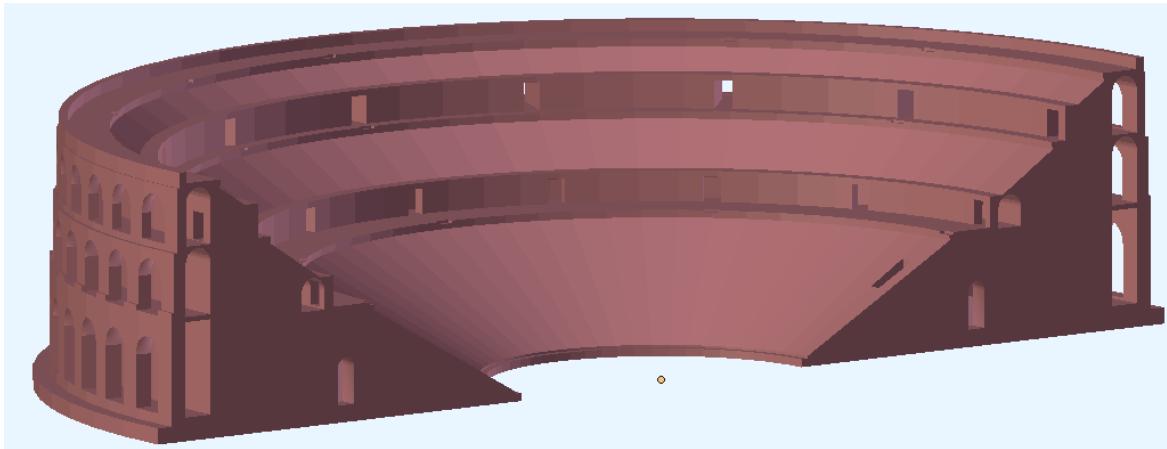
Pour trancher sur la décision nous adoptons la règle suivante :

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

Cela permet de trancher dans le choix des cotes tout en prenant en compte la possibilité que les pierres se soient érodées. Nous prenons dans un premier temps le partie pris de modéliser la **cavea** avec des cotes identiques sur tout son pourtour.

Pour cette même longueur, A.Carisite (voir fig. A.2) donne des mesures encore différentes :

$$4,55 + 2,70 + 0,95 = 8,20m.$$

FIGURE 2.1 – Modélisation de la **cavea**

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 A.1 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 en un seul bloc sur 180° mais chaque caisson va être séparé de son voisin pour laisser l'espace des vomitoires. 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 ces 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 la substructure du deuxième maenianum on complète le modèle afin que la première precinctio 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.3, de :

$$1,34 + 14,22 + 1,17 + 3,55 + 1,19 = 21,47m.$$

Or on a :

$$4,35 + 0,91 + 2,41 + 0,88 + 4,48 = 13,03m.$$

En les ajoutant aux 8m91 déjà modélisés, on arrive à :

$$13,03 + 8,91 = 21,94m$$

soit 47cm de différence.

A.Caristie (fig. A.2) donne 8m entre les podiums du deuxième et du troisième niveau contre 8m68 pour M. Fincker et J.M Labarthe (fig. ??). 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 remblais 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 au premier niveau la precinction, le podium, l'ambulacre et son mur interne. Au deuxième niveau, la precinction du deuxième niveau est par contre créée à partir du podium car on connaît sa longueur et son élévation. Cela nous donne 7m96 entre les podiums du deuxième et du troisième niveau ce qui corrobore la valeur de A.Caristie.

Il reste la substructure du premier maenianum. Ici encore la longueur des gradins n'est pas stipulée. Par contre, A.Caristie (fig. A.2) 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. Cette valeur est proche de la demi-longueur du mur de scène auquel on ôte la basilique :

$$51,96 - 21,47 = 30,49m.$$

Il ne manque que l'information de la largeur du marche pied et de la couverture du caniveau pour connaître l'espace réservé au premier maenianum et terminer cette partie. Ces dimensions sont obtenues par mise à l'échelle des plans (fig. ?? et A.2). Il reste également un doute sur le fait que la precinction arrive bien à l'affleurement de la basilique puisque ce n'est pas le cas sur la représentation de la coupe des aditus (voir fig. A.4a et A.4b).

Une fois ce plan de coupe réalisé on utilise le **modifier "Screw"** sur 90° et le **modifier "Mirror"** qui permet recopier des objets en miroir pour l'obtenir en volume sur un hémicycle. Le **modifier "Screw"** n'est pas utilisé sur 180° directement car une fois appliqué il faut fermé le maillage, or, la présence des différentes galeries empêchent de créer une seule face pour fermer la structure. Effectivement Blender ne comprend pas quels points sont à relier ensemble si le problème n'est pas subdivisé. Il faudra donc créer des faces dont tous les bords sont concaves. L'utilisation du **modifier "Mirror"** permet de n'effectuer cette opération que sur un seul des cotés de l'objet. Appliquer le **modifier "Screw"** et fermer le maillage sera indispensable par la suite pour utiliser le **modifier "Boolean"** qui permet des opérations d'addition, de soustraction ou d'intersection entre objets.

Cette structure va donc ensuite pouvoir être percée par différents objets à commencer par les arcades donnant sur l'extérieur. Celles-ci sont créées en élévation grâce à ce même plan de coupe théorique (fig. ??). Leur largeur de 3,419m est donnée par le plan de A.Caristie (fig. A.2). On estime que l'entrée des **aditus** est également de cette largeur et s'élargit par la suite au niveau des **parodos**. On peut considérer que les arcades des trois niveaux ont une hauteur différente mais une largeur identique notamment 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 dans le cas où il le théâtre n'aurait pas été adossé à une colline, il y aurait eu 31 arcades sur chaque niveau. C'est le résultat que l'on obtient en prenant l'hypothèse que la largeur des arcades est constant tout comme leur espacement et cela corrige le plan de A.Caristie qui lui, présente 33 arcades sur toute la périphérie. Un triplet d'arcades verticales placé au niveau de l'aditus oriental est alors répété à l'aide d'un **modifier "Array"** qui permet de répéter n fois un objet de manière circulaire autour du centre de la cavea avec un angle de $6,13^\circ$. Leur nombre est paramétrable et importe peu puisque la colline viendra en masquer une partie, par contre

les arcades orientales devront être reflétées en miroir sur la partie occidentale. Effectivement, l'arcade de références étant sur la partie rectiligne de la cavea, on ne peut pas utiliser la rotation sur 180° car la dernière n'arriverait pas dans l'axe. On peut fixer à 15 le nombre de triplet d'arcade de chaque côté de la cavea dans un premier temps (c'est à dire toutes sauf celle dans l'axe) et lorsqu'on appliquera les "modifier", on supprimera celles en trop. Ne pas mettre l'arcade centrale permet de visualiser l'effet de la soustraction sur la cavea avant l'application des "modifier". Effectivement, avec une seizième arcade on aurait une superposition de deux objets identique au niveau du miroir et cela est mal géré par Blender dans un **modifier "Boolean"**.

Au niveau de la première et deuxième **précinctio**n on perce la structure à l'aide d'un nouveau **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. Le niveau bas est au niveau de la **précinctio**n 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. Ces passages sont disposés dans l'espace entre deux caissons. La forme de référence est donc répétée avec un angle de 21,95° grâce au **modifier "Array"** et l'ensemble est pivoté de 2° autour de l'axe Z.

Une porte venant des aditus permet aux spectateurs de se rendre à mi hauteur de l'*ima cavea*. La modélisation de cette cage d'escalier est décrite dans la section 2.10, néanmoins, on note que l'objet *cavea* va être percée d'une ouverture permettant aux spectateurs de se rendre au dixième gradin.



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, la première porte 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 **precinctio**n. 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 **precinctio**n (pl. VI). Une dizaine de marches aurait permis d'aller de l'ambulacre à la **precinctio**n. Du côté ouest, J.-C. Formigé a restauré un escalier de 32 marches conduisant à l'ambulacre (fig. 428)

2.4 Les maenianum

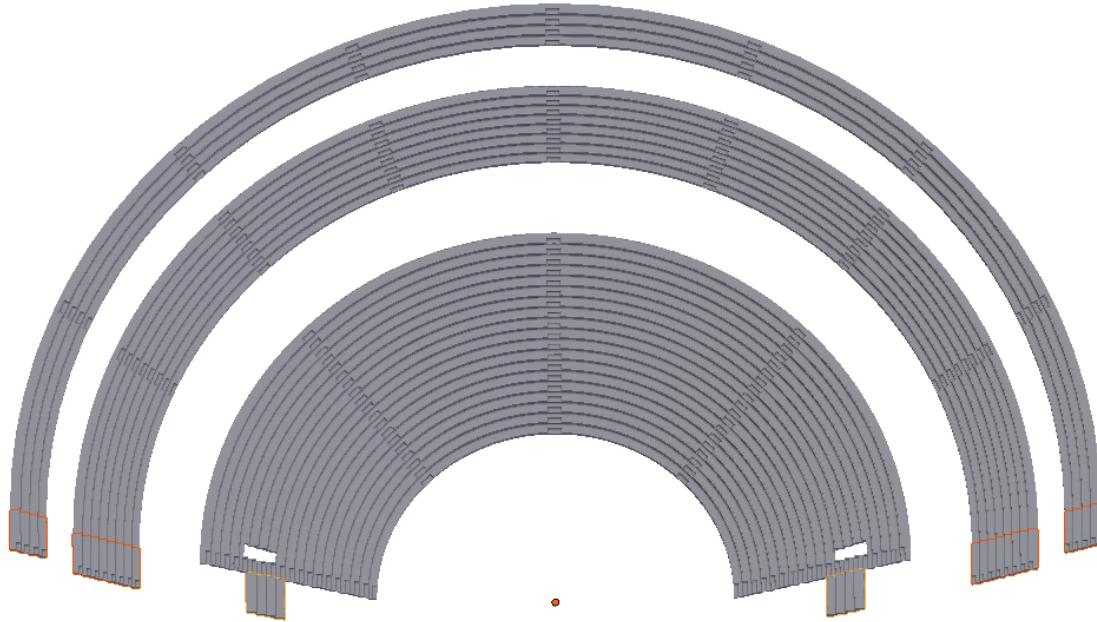


FIGURE 2.3 – Modélisation de la **cavea**

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 2.4a). Les gradins étaient à priori assemblés à partir de blocs rectangulaires sciés en deux sur une diagonale décalée d'une dizaine de centimètres à partir de l'angle. Ce méplat permettait de poser les blocs les uns sur les autres. Le reste de leur longueur reposait sur de l'*opus caementicium*, sorte de remblai constitué de mortier et de tout-venant qui n'est pas modélisé.

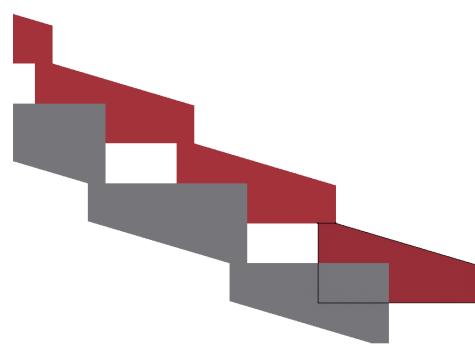
On commence par créer le marche pied dont on place l'extrémité à 14m95 du centre (fig. A.2). Sa largeur sera de 50cm dont 40cm apparents et 10cm recouvert par le premier gradin. Le premier gradin est donc placé à 15m35 du centre et possède un méplat de 10cm positionné au dessus du marche pied. La hauteur du gradin est des 45cm et sa partie haute mesure 89,6cm au total dont 10cm recouvert par le gradin suivant. Celui-ci sera répété 19 fois avec un **modifier "Array"** dont le décalage relatif est de 1 sur Z et 0,889 sur X (ce qui permet de positionner le gradin suivant sur son méplat). Le dix-neuvième gradin arrive ainsi à 30m59 du centre ce qui permet que la precinctio le recouvre bien de 10cm comme un ultime gradin. De la même manière pour le deuxième maenianum, on place le premier gradin à 95cm du bord du podium comme indiqué sur la figure A.1 et on donne comme longueur 69cm apparents et 10cm recouverts par le prochain gradin. Sa hauteur est également de 45cm. On répète la forme 8 fois avec le même **modifier "Array"** pour que le dernier gradin arrive à 41m50 du centre soit 10cm de plus que la precinctio. On effectue exactement la même opération sur le troisième maenianum lui donnant une hauteur de 49cm et une longueur de 85,7cm dont 10 recouverts par le gradin suivant. On constate donc que le deuxième maenianum présente une pente de 33,11° qui est plus raide que le premier maenianum dont la pente est de 29,48°. Par ailleurs le troisième maenianum présente une pente de 32,9° soit à peu près comme le premier maenianum mais avec plus

de hauteur et de profondeur.

À partir de ces objets plans, on applique le **modifier "Array"** selon le nombre de gradins par maenianum, soit respectivement 19, 8 et 4 (la precinction faisant office de gradin supplémentaire). On peut alors utiliser ensuite un **modifier "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 des aditus on duplique la forme de base des trois maenianum pour en faire une partie rectiligne de 3,6m à l'aide d'un **modifier "Solidify"** qui permet de donner une épaisseur paramétrable à un objet plan. Les deuxième et troisième maenianum sont complets sur cette partie tandis que le premier ne comporte que les gradins 10 à 14. Ces gradins rectilignes sont symétrisés grâce à un **modifier "Mirror"**.



(a) Le repose pied et le premier gradin du premier maenianum : vu de l'extrême nord avec au mur bordant l'aditus est



(b) Modélisation des **maenianum** et de l'escalier : vu de l'extrême nord avec au mur bordant l'aditus est

des modifieurs Array et Screw

En ce qui concerne les escaliers, nous créons d'abord une forme plane de base pour un gradin. Chaque marche mesure la moitié de la hauteur et de la profondeur apparente d'un gradin et il s'agit d'en découper le coin extérieur. Pour cela, pour chaque meanianum, on crée une copie du gradin de référence (la forme plane sans modificateur) à qui on fait effectuer une rotation de 180° autour de sa normale. On place ensuite le coin extérieur de la copie au centre du gradin (voir figure 2.4b) et on la décale de cinq centimètres sur sa longueur. On applique alors à cet objet "escalier" le même **modifier "Array"** que pour les gradins pour répéter la forme sur toute la hauteur du maenianum. On utilise ensuite un **modifier "Solidify"** pour donner à l'escalier sa largeur. Cette valeur est fixée d'après [BADIE et collab., 2013a, Pl. XIX] mais reste modifiable. On utilise à nouveau un **modifier "Array"** pour répéter de manière circulaire les escaliers autour du centre de la cavea. On a ainsi cinq escaliers 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 répété 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 paramètrer son **modifier "Solidify"** avec un offset de -1 au lieu de 0. Cela permet d'extruder le plan d'un coté uniquement alors qu'un offset 0 extrude le plan de part et d'autre. On effectue la même

démarche pour le repose pied. Pour les deuxième et troisième maenianum, les traces présentes sur le mur des basiliques indiquent que les escaliers 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 **modifier "Mirror"** pour les rendre symétriques par rapport au centre de la cavea. Une fois les modifiers appliqués 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 précinctation de l'objet cavea. Le premier maenianum est également percé, tout comme la cavea, au niveau de l'entrée menant au dixième gradin.

2.5 Les **aditus** et les tribunes

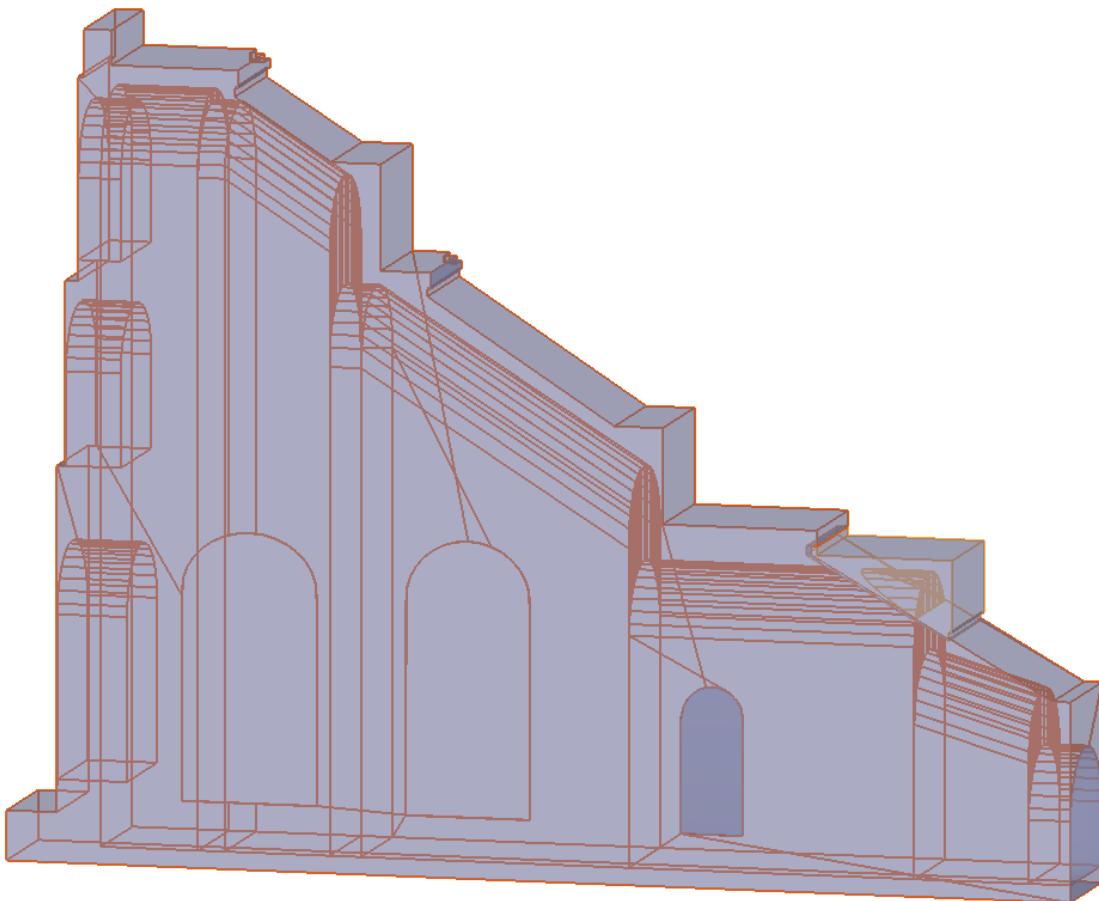


FIGURE 2.5 – Modélisation de l'**aditus** occidental et de sa tribune

Les aditus sont en réalité une extension de la cavea qui se prolonge de manière rectiligne sur l'axe Y (sud-nord). 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 des **parodos**. Or les relevés (voir figure A.4a et A.4b) stipulent des mesures qui diffèrent d'un aditus à l'autre. Par ailleurs ces plans donnent également des informations contradictoires avec la coupe théorique de la cavea (fig. A.1) ayant servi de référence pour la modélisation de l'objet "cavea". Néanmoins, nous avons vu dans la section 2.3 les différentes causes possibles d'incohérence au niveau des cotations. Il faut donc trancher, et dans un premier temps, nous modélisons les aditus est et ouest de façon à ce

qu'ils coïncident avec la cavea. Il sera facile dans un deuxième temps d'affiner les cotes de chaque aditus si l'on souhaite que le modèle porte ces informations. On comprend donc qu'il s'agit ici d'un choix de modélisation privilégiant des cotes théoriques, ou en tout cas, moyennes en dépit de cotes exactes relevées en certains points précis. Cela permet d'avoir une cavea à un niveau d'élévation parfaitement constant d'une basilique à l'autre.

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 A.4a pour l'aditus occidental et la figure A.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 permettant de creuser les objets "aditus" par **modifier "Boolean"**. Celles-ci sont alignées sur l'axe X (est-ouest) à 1m80 de l'origine car la figure A.3 indique que la partie rectiligne de la cavea mesure 3m60. Leur largeur, et donc la largeur des 2.2, est de 1,52m d'après [BADIE et collab., 2013a, Pl. XXI] et en appliquant la règle 1. Les aditus sont symétrisés à l'identique à l'est et à l'ouest par recopie via un **modifier "Mirror"** mais les voûtes à l'intérieur sont différencierées et modélisées selon les figures A.4a et A.4b. La partie extérieure est modélisée grâce à une copie de l'objet cavea que l'on coupe à partir du dixième gradin pour laisser l'espace aux **parodos**. L'objet plan est ensuite épaisse 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. À 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 percés par deux grandes baies à arcature donnant dans les basiliques. Les figures A.4a et A.4b en donnent les élévations tandis que leur largeur est donnée par A. Caristie (fig. A.2) du côté occidental. Celles-ci seront réutilisées du côté oriental. Les aditus sont également percés par la porte (symétrisée en miroir) donnant accès aux tribunes dont la modélisation est décrite dans la section 2.10.

La tribune est modélisée séparément afin de venir s'imbriquer sur l'aditus. Elle repose sur le quatorzième gradin et s'élève jusqu'à 48m98 soit environ la moitié du dix-neuvième (voir fig. A.4a). Sa bordure donnant vers l'orchestre est alignée avec celle du quinzième gradin.

2.6 Le mur de scène et ses basiliques

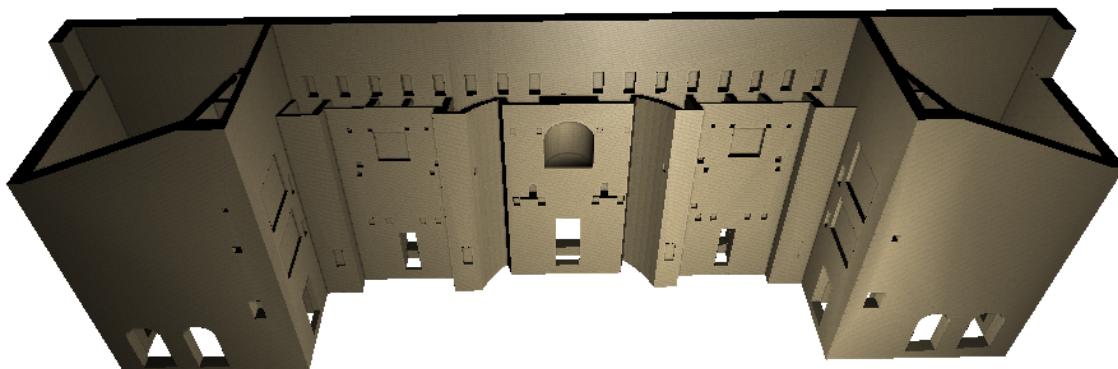


FIGURE 2.6 – Modélisation du **postscaenium** et de ses **basiliques**

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.3. La première étape est de positionner un

point aux coordonnées suivantes [-51,96 ; 3,6 ; 40] correspondant au point sud-ouest de la base de la basilique ouest. On extrude alors ce point selon les axes X et Y en respectant les cotes indiquées afin de tracer la forme extérieure du mur. Lorsqu'une cote n'a pas été spécifiée on utilise la mise à l'échelle du plan. La seule partie qui n'est pas alignée sur les axes X et Y est l'**exedre** curviligne enclavant la porte royale. Celle-ci est modélisée à partir d'un cercle de 23,5m de diamètre pour lequel on ne garde que six segments à gauche et sept à droite et qui forme la partie incurvée du mur. Une fois le contour de la base complet, on extrude le plan ainsi obtenu verticalement jusqu'à 76,42m, ce qui correspond à la plus haute élévation du mur. Sont ensuite créés des objets 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.

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 de la couverture de la scène. Cet angle de 19,25° est aligné avec les traces que la couverture a laissé sur le mur et coupe l'intégralité du sommet du **postscaenium**. On creuse également la façade sud du mur nord avec un objet "poutre" dont la modélisation est expliquée dans la section 2.8 afin de créer les trous d'encastrement. La partie sommitale des basiliques est également découpée en soustrayant un objet dont la forme est dessinée selon la méthode suivante. Ayant plus d'information sur la basilique occidentale que sur l'orientale, la même forme sera reproduite en miroir pour les deux basiliques et on appliquera le modifier pour pouvoir modifier les cotes qui diffèrents. Avec de nouvelles informations il sera par la suite facile pour les archéologues d'affiner les autres cotes de la partie orientale en corrigeant cet objet. Le sommet des murs est et ouest des basiliques se présente horizontalement tout comme la partie au dessus des **parascaenium**. Nous les plaçons selon les élévations des figures A.4a et A.4b. Sur le mur sud, ces deux parties se rejoignent avec une pente de 21°. On laissera le mur nord revenir sur les flancs extérieurs sur 4,3m [BADIE et collab., 2013b, p. 38]. Pour créer la pente sommitale du mur séparant la basilique avec la cage d'escalier qui soutenait la charpente de la couverture on utilise la figure A.7. On constate à ce stade un problème d'incohérence avec le plan A.3 qui indique comme longueur de mur 15m44. En appliquant l'échelle de la figure A.7 on obtient 16m de longueur. Ce plan a pourtant l'air correct car les dimensions de la porte donnant dans les combles correspondent bien à celles indiquées dans le rapport. On comprend alors que l'épaisseur des murs diminue avec la hauteur. Cet amincissement s'opère à priori au moment des changements d'ordre et paraît logique d'un point de vue architecturale. Effectivement les parties hautes sont souvent plus fines que les parties basses afin d'alléger la charge et améliorer la portance. Il suffit donc d'augmenter la longueur des salles des basiliques au niveau du troisième ordre pour obtenir la bonne cote. N'ayant pas d'information précise sur l'épaisseur des murs entre les combles et la base du théâtre, nous conservons les cotes initiales du bas du bâtiment. Néanmoins, ces données pourront être affinées par la suite.

Pour réaliser les 17 portes donnant sur la **porticus post scaenam** on utilise également le plan A.3 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]. On note que certaines portes arrivent à l'affleurements des pièces du **postscaenium**, or les **modifier "Boolean"** se comportent

mal lorsque deux faces sont superposées entre l'objet soustrait et l'objet à soustraire. Pour résoudre ce problème, on décale la porte de quelques millimètres ce qui créera une légère saillie sur le mur mais qui pourra être corrigée une fois le modifier appliqué. A l'intérieur du [postscaenium](#) se trouvent également des passages permettant d'accéder d'une pièce à l'autre pour chaque étage. On utilise les figures 1.2, 1.3 et 1.4 pour les placer dans le plan XY et on les positionne en élévation au niveau du bas du podium de chaque ordre. Leur forme est donnée par A.Caristie [BADIE et collab., 2013a, Pl. II]

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 du plan A.5. 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] ou grâce aux valeurs numériques indiquées dans le rapport BADIE et collab. [2013b] et sont symétrisés par rapport à la porte royale. De part et d'autre de cette dernière 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. L'assemblage se fait en faisant la différence des deux objets et en inversant les normales du demi-cylindre formant la voute. Au dessus des portes latérales du front de scène et au niveau du troisième ordre se trouve deux niches que l'on creuse dans le mur sur la moitié de son épaisseur, ce qui correspond également à la profondeur de la porte d'après le plan A.3. Leur emplacement est déterminé par le plan A.5. En considérant ces deux plans ainsi que le relevé A.6 on crée sur les murs de retour les portes donnant aux [parascaenium](#), les niches ainsi que les ouvertures qui permettaient vraisemblablement à l'époque l'apparition de personnages sur des balcons.

2.7 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 figures A.4a et A.4b 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 pourra être, dans une prochaine étape, creusé à l'aide de [modifier "Boolean"](#) pour réaliser l'hyposcaenium et le caniveau décrit dans [BADIE et collab., 2013b, Chap. VI].

2.8 Les couvertures du bâtiment de scène et les circulations internes

Nous avons expliqué dans la section 1.4.2 quelles sont les hypothèses de reconstitution de la couverture du pulpitum et avons vu que plusieurs proposition existent. Nous en avons choisi une à implémenter dans le modèle sans toute fois entrer dans une étude de construction architecturale. Nous modélisons donc l'hypothèses de [BADIE et collab., 2013b, Chap. I, sect. 6] qui remet en question celle de Caristie. Nous créons dans le plan YZ un parallélogramme incliné à 19,25° épousant l'emprunte dans le mur donnée par la figure 1.6b. Cette forme plane est placée à 27,25m du centre sur l'axe X pour correspondre

à la figure A.5. En utilisant un **modifier "Solidify"** sur 1,2m nous créons une poutre en volume. Cette largeur est une moyenne approximative déterminée d'après les trous d'enca斯特ment actuellement visible. Ceux-ci ayant subit de nombreuses altérations il est très difficile de déterminer une largeur crédible sans une étude approfondie du sujet. L'**IRAA** explique même que plusieurs toitures différentes auraient été testées, voire utilisées durant le vie du théâtre et qu'il n'y a donc pas une unique solution [BADIE et collab., 2013b, p. 34]. Néanmoins une simple modification du paramètre de largeur permettra de tester facilement les différente hypothèses. Cette poutre est alors répétée dix-sept fois avec un espaceissement de 2,83m par un **modifier "Array"** (espacement moyen estimé pour les mêmes raisons que les largeurs). Nous créons ensuite un nouvel objet composé de trois plans de quelques centimètres d'épaisseur allant d'une basilique à l'autre encapsulant les poutres par le dessus, dessous et devant. Le plan de devant est vertical et simule l'emplacement d'une frise décorant la devanture du toit. Les deux autres simulent respectivement le dessus et le dessous de la toiture.

Nous avons vu dans la section 2.6 comment a été modélisé le somment des basiliques et quel en étaient les cotes. Nous reprenons donc ces valeurs pour modéliser la couverture de cette partie du bâtiment. On utilise uniquement des plans car l'aspect volumique ne nous intéresse pas à ce stage de l'étude. Seul la forme et la présence de cet objet nous est utilisée et celle-ci pourra être améliorée par la suite par des experts charpentiers. La structure se compose d'un partie plate couvrant le parascaenium et la cage d'escalier inclinée à 21° comme le mur la soutenant et d'un plan couvrant la basilique coupé en deux triangles représentant l'arêtier. On place également au dessus de la basilique un plancher supporté par six poutres qui faisait office de combles. Les trous d'encastration supposent des poutres alignées sur l'axe est-ouest de largeur : 55cm, de hauteur 48cm et enfoncées de 48cm en moyenne. Nous en modélisons une que nous plaçons à l'aide de du plan A.7 et que nous répétons six fois avec une **modifier "Array"** avec une espaceissement de 4m18. Cette structure sera dupliquée pour créer les deux autres paliers de la basilique. Leur élévations sont données par ... explication des escaliers

2.9 La porticus in summa cavea

Au dessus du troisième maenianum se trouvait une **porticus in summa cavea** faisant tout le tour de la cavea. La première colonne était encastrée sur la moitié de sa largeur dans le mur de la basilique, c'est d'ailleurs grâce à cela que l'on peut connaître ses dimensions. On sait par ailleurs que l'entrecolonnement d'une porticus était constant et précis dans les théâtres romains. On crée donc la première colonne avec une forme géométrique grossière correspondant au dessin de Caristie que l'on duplique en miroir. C'est deux colonnes sont créées séparément car elles sont au dessus des aditus donc en dehors du cercle formé par la cavea. On va ensuite créer la suite de colonne circulairement autour de la cavea comme nous l'avons fait pour les caissons (voir 2.3). Or on se pose la question du nombre de colonnes qu'il y a en tout. Caristie suppose qu'il y en 34, c'est à dire cinq pour les **cuneus** aux extrémités de la cavea et quatre aux autres. On prend comme hypothèse que les escaliers arrivent toujours à égale distance de deux colonnes successives. On mesure entre la première colonne et l'escalier E13 (voir 1.3) un angle de 28,35°. Cet angle correspond à $n+0,5$ fois l'entrecolonnement que l'on cherche. Dans l'hypothèse de Caristie il y a quatre colonnes par cuneus plus une encastrée. Sur le rapport de l'**IRAA** [BADIE et collab., 2013a, Pl. XX] il y en a quatre aussi pour les six cuneus centraux et de plus pour les cuneus latéraux. On remarque que dans ce dessins l'entrecolonnement n'est pas régulier, ce qui est contraire à nos hypothèses de modélisation. On va donc chercher le

nombre de colonnes nécessaires dans nos conditions avec une, deux ou trois colonnes supplémentaires sur les cuneus latéraux. On résout alors le système d'équation suivant pour Caristie :

$$\begin{cases} \alpha \times n_{Col} = 21,95 \\ \alpha \times (n_{Col} + n_{Sup} - 0,5) = 28,35 \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec :

α : l'angle décrit entre deux colonnes

n_{Col} : le nombre de colonnes dans les cuneus centraux

n_{Sup} : le nombre de colonnes en plus dans les cuneus latéraux

On obtient :

$$n_{Sup} = 1 \Rightarrow \alpha = 12,8^\circ \text{ et } n_{Col} = 1,7$$

$$n_{Sup} = 2 \Rightarrow \alpha = 4,7^\circ \text{ et } n_{Col} = 5,14$$

$$n_{Sup} = 3 \Rightarrow \alpha = 2,56^\circ \text{ et } n_{Col} = 8,57$$

Ces résultats montrent que l'agencement le plus probable est d'avoir cinq colonnes par cuneus et deux de plus pour les extrémités de la cavea. On ne tombe cependant pas sur un chiffre rond mais on peut estimer que cette erreur de $0,14^\circ$ est négligeable sur l'ensemble de la structure. Dans le modèle nous positionnons donc une colonne en $y = 0$ et en $x = -46,78$ (distance correspondant à la troisième precinctio). Celle-ci est répétée 42 fois pour atteindre 180° et se retrouver en symétrique de l'autre côté de la cavea. On utilise pour cela un **modifier "Array"** autour d'un angle de $4,39^\circ$ soit $180^\circ/41$. On obtient donc un entrecolonnement de :

$$\frac{l}{2} = 46,78 \times \sin\left(\frac{180}{2 \times 41}\right) \quad (2.2)$$

$$\text{soit } l = 3,58m$$

Une colonne supplémentaire et son symétrique sont encastrées de moitié dans le mur de la basilique en $y = 3,6m$ ce qui nous donne bien un entrecolonnement régulier sur l'ensemble de la **porticus in summa cavea**. La couverture de celle-ci est modélisée à partir de la représentation de A.Caristie [BADIE et collab., 2013a, Pl. III et VI] puis extrudée à l'aide d'un **modifier "Screw"** autour de la cavea et d'un **modifier "Solidify"** couplé à un **modifier "Mirror"** au dessus des aditus.

2.10 Les escaliers

2.10.1 Accès aux tribunes par les aditus

À l'est et à l'ouest, depuis l'intérieur des aditus certains spectateurs privilégiés avaient accès aux tribunes par un escalier menant à la moitié de l'ima cavea. Ceux-ci n'ont pas été restaurés mais le plafond vouté est néanmoins visible aujourd'hui (voir fig. 2.2). Pour modéliser cet escalier, on sait que la première marche commence à 41,11m d'altitude et la dernière arrive à 45,58m. Or celui-ci débouchait probablement au dixième gradin, là 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 à 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 ...

2.10.2 Accès à la cavea depuis l'extérieur

2.10.3 Les cages escaliers des **parascaenium**

2.10.4 Les escaliers extérieurs

2.11 Les rambardes et le **balteus**

2.12 La colline Saint-Eutrope

La colline Saint-Eutrope qui soutient donc le théâtre sur sa partie méridionale a été modélisée d'après les lignes d'altitude représentées sur la figure A.8. On commence par créer la ligne la plus basse que l'on trace point par point pour faire une face de base. Celle-ci sera alors extrudée vers le haut six mètres par six mètres. Tranche par tranche on ajuste les points pour coller au plan. Seule la partie soutenant le théâtre nous intéresse, la partie sud de la colline se termine donc simplement en reliant les points du flanc ouest et est. Les élévations ont ensuite été légèrement adaptée tranche par tranche pour s'encastre 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. Il sera notamment appréciable d'affiner précisément la partie soutenant le théâtre ce qui risque d'être difficile de par la non accessibilité du terrain. Le plus important est d'être précis sur la substructure de la cavea en plaçant les murs séparant les ambulacres de la colline précisément. Effectivement la roche naturelle n'était pas apparente à l'intérieur du théâtre. Elle l'est aujourd'hui par endroit, notamment les les pièces du premier ambulacre mais celles-ci ne sont pas d'origine.

Chapitre 3

Applications

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

Keith Johnstone

Sommaire

3.1 Les couvertures du bâtiment de scène et les circulations internes	30
3.2 La porticus in summa cavea	30
3.3 Le velum	30
3.4 Les escaliers	30
3.5 Les rambardes et le balteus	30

3.1 Le velum

Il existe de nombreuses théories sur la disposition des velum des théâtres romains et pour cause, il en reste très peu de trace et que quelques documentation d'origine ne décrivant qu'approximativement cette toile protégeant le public du soleil. Nous choisissons donc d'adopter la représentation de A.Caristie [BADIE et collab., 2013a, Pl. VI] qui bien qu'hypothétique est une source toute aussi vraisemblable que les autres. On s'intéresse d'abord aux consoles soutenant les mats sur la face nord du battement de scène. Pour les positionner, on utilise la représentation de la façade nord de Caristie (Pl.III) en créant une console centrée en haut du mur reproduite 21 fois horizontalement et une fois verticalement. On note que leur espacement est de 1m91. Ces deux séries sont ensuite symétrisées par miroir. On ajoute une dernière paire de console en bord de mur symétrisée de la même manière. Les élévations ne sont pas parfaitement connues, c'est pourquoi on utilise la mise à l'échelle du plan de Caristie. Leur forme est rectangulaire et pourra par la suite être dessinée d'après leur forme réelle. Comme expliquée dans la section 1.4.3 seule douze de ces consoles pouvaient accueillir un mât. Ceux-ci, de forme cylindrique, sont donc modélisés et insérés dans les consoles, traversant celle du haut et perçant sur la moitié de sa hauteur celle du bas. Sur sa représentation du velum en vue du dessus Caristie ne représente que 39 consoles sur le mur arrière au lieu de 43 ce qui rend ce dessin peu fiable, néanmoins, nous utiliserons ce concept d'anneau central en fer à cheval que nous modélisons de manière fidèle à sa représentation. L'objet de référence est également munie de deux longs et fins cylindres représentant des cordages et reliant les masts à deux boucle au bout du fer à cheval. Tout autour de la cavea se trouve également deux séries de consoles fixées au mur arrière de la **porticus in summa cavea**. L'agencement le plus crédible est représenté sur le dessin de la face est (Pl. IV) c'est à dire un jeu de deux consoles entre chaque **pilastre** du mur extérieur. Il y aura donc deux fois plus de masts que d'arcades à chaque niveau de la cavea (en supposant qu'il y ai des arcades sur tout le tour). Nous avions 31 arcades, on peut donc placer 62 masts et leur paire de consoles respective. Il y a deux masts de part et d'autre au niveau des aditus, il y en aura donc 58 à repartir autour de la cavea. Pour déterminer l'angle, on se base sur les 31 arcades précédemment modélisées (voir section 2.3). On utilise la moitié de leur angle c'est à dire 3,06°. L'angle total formé par ces 58 masts est de 174,42°, il faudra donc effectuer une rotation de l'ensemble de 2,79°. L'objet de référence se composant d'une paire de consoles, d'un mât et d'un cordage reliant l'anneau centrale sur l'axe X est placé en $y = 0$ et $x = -51,64$. Pour placer des consoles de l'aditus on calcule l'espacement entre les masts :

$$l = 51,64 \times \sin(3,06) \quad (3.1)$$

soit $l = 2,76m$

Le premier mât autour de la cavea étant à 2,79° de l'axe Y, on calcule la position du mât de référence pour les aditus :

$$l = 51,64 \times \sin(2,79) \quad (3.2)$$

$$l = 2,51m$$

donc $y = 0,25m$

On utilisera ensuite un **modifier "Array"** pour répéter une fois l'ensemble mât-consoles-cordes avec une distance de 2,76m et un **modifier "Mirror"** pour le symétriser à l'est. Encore une fois on constate que la modélisation contredis les dessins de Caristie qui représentaient 67 masts autour de la cavea. On comprend donc que son intention sur ce type de représentation était plus une étude de principe qu'une restitution vraisemblable.

Pour modéliser le voilage située au dessus de la cavea, nous allons dans une première étape uniquement placer des objets plans entre chaque cordages. Il suffit pour cela d'utiliser une des arrêtes de la corde pour créer un nouvel objet comportant les mêmes propriétés (centre et modifier). Il suffit ensuite d'utiliser un **modifier "Screw"** pour étendre le plan entre les deux cordages sur 2,79° ou moins si l'on souhaite laisser du jour avant le prochain cordage. On peut également tourner l'arrête de référence et changer le nombre de répétition pour ombrager une partie ou l'autre de la cavea. Grâce à cela nous pouvons tester l'ensoleillement du théâtre et le nombre de voiles à déplier pour abriter les spectateurs. Nous utilisons pour cela un objet "Lamp" de type "soleil" qui émet une lumière paramétrable depuis l'infini dans une direction choisie. On réalise ainsi l'animation d'une journée du levé au couché du soleil et on analyse selon l'angle au zénith la façon dont les velum devaient être déployés.

Dans un deuxième temps on peut simuler l'ouverture et la fermeture réaliste des toiles en leur affectant une propriété physique ce type "cloth". Il faut pour cela créer des toiles rectangulaire de largeur 2m76 et les subdiviser dans un nombre important de petits rectangle. On peut alors sélectionner sur le bord des toiles des points qui resteront accrochés au cordes (en pratique il y aurait des anneaux pour faire coulisser les toiles sur les cordes). On place alors ces points en position "velum déployé" puis "velum rentré" leur affectant à chaque fois une **keyframe** pour réaliser l'animation. Lorsque l'outil physique est appliqué la toile subit l'effet de la gravité et elle se plie avec une résolution correspondant à la subdivision effectuée précédemment. On peut alors lancer l'animation pour voir le velum se déplier. En utilisant l'option de **baking**, on peut passer l'animation à l'endroit et à l'envers sans avoir besoin de refaire un rendu.

3.2 Le rideau de scène

3.3 Les système de particules

3.3.1 Les spectateurs

Une fois le théâtre modélisé, nous pouvons ajouter des spectateurs dans les gradins. Ceux-ci sont fixe dans un premier temps mais pourrait être animés lors de visualisation vidéo. La modélisation des personnages ne sera pas décrite dans ce document, néanmoins, on peut noter que différent type de personnages pourraient modélisés car leur placement dans le théâtre est dépendant de leur classe sociale.

Pour représenter un type de personnage il faut le prendre comme objet de référence et le placer dans une position assise à l'aide d'**armatures**. Il faudra ensuite créer un nouvel objet correspondant au bord des gradins afin que les personnages soient bien positionner sur ceux-ci. Cet objet est subdivisé plusieurs fois puis l'outil d'élimination de double vertice est utilisé afin de conserver entre chaque vertice l'espace requit pour un personnage. On lui affecte alors un système de **particules** de type "hair" auquel on associera le personnage de référence ou le groupe de personnage (si on a choisi de diversifier les personnages qui apparaîtront). On peut ainsi choisir le nombre de personnages à afficher. Par contre se pose un problème de disposition qui n'est pas très aléatoire. Pour augmenter l'effet de répartition aléatoire (notamment si on ne veut pas un amphithéâtre rempli), on pourra effectuer une sélection aléatoire des vertices de l'objet et les assigner à un "Vertex Group". On n'affichera alors que les particules sur ce groupe de vertices.

3.3.2 Les arbres

De la même manière que pour les spectateurs, on utilise un système de **particules** de type "hair" pour générer des arbres sur la colline. Il est bon de noter que cette opération ralenti considérablement le logiciel car une grande quantité de vertices doivent être traité. On ne l'utilisera donc que pour exporter des rendus images ou vidéos. La modélisation des arbres peut se faire simplement à l'aide de l'outil "tree" qui permet de configurer le tronc, les branches et les feuilles d'un arbre. On peut alors modéliser les espèces d'arbres se trouvant à Orange.

3.4 Texturing

Le modèle de base ne présente que des matériaux simples avec des couleurs unis. Il est cependant possible de plaquer des textures directement dans Blender afin de rendre l'aspect plus réaliste. Les colonnes pourront donc avoir un plaquage de marbre par exemple ... normale maps et displacement ...

3.5 Autres projets ayant utilisés le modèle

Conclusion

Nous constatons que l'engouement actuel autour de la 3D n'a pas un simple enjeu de divertissement, mais possède une réelle force heuristique. Bien que le procédé de modélisation soit très ancien, notamment la représentation par maquette réduite qui fut particulièrement marquante dans le monde archéologique, on constate que les méthodes numériques ouvrent de nouveaux horizons à la science.

"la modélisation 3D rend compte de ce qui est connu d'un sujet, et surtout de ce qui est inconnu, car elle force le chercheur à s'intéresser à l'ensemble des éléments d'une construction. [...] Un modèle 3D peut tenir lieu de résumé de la connaissance sur un sujet et constituer une excellente synthèse de ce qui est connu et inconnu" ROCHELEAU [2010].

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](#), [10](#), [11](#), [12](#), [13](#), [14](#), [20](#), [26](#), [28](#), [29](#), [30](#), [31](#), [32](#), [36](#)
- 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](#), [15](#), [24](#), [29](#), [30](#), [31](#)
- 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](#)
- BLENDER. 2017, «Manuel blender», URL <https://docs.blender.org/manual/fr/dev/>.
- FINCKER, M. et J.-C. MORETTI. 2009, «Le rideau de scène dans le théâtre romain», dans *La scaenae frons en la arquitectura teatral romana*, édité par S. Ramallo Asensio et N. Röring, Actas del Symposium Internacional celebrado en Cartagena, Universidad de Murcia Fundación Teatro Romano de Cartagena, Museo del Teatro Romano, p. 309–329.
- FLEURY, P. et S. MADELEINE. 2007, «Réalité virtuelle et restitution de la rome antique du iv^e siècle après j.-c», *Histoire urbaine*, vol. 1, n° 18, p. 157–165. [19](#)
- FORMIGÉ, J. 1923, *Remarques diverses sur les théâtres romains, à propos de ceux d'Arles et d'Orange, Sujets divers d'érudition*, vol. 13, Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des inscriptions et belles-lettres de l'Institut de France. [5](#), [10](#), [11](#), [12](#), [16](#)
- GOLVIN, J.-C. 2005, «L'image de restitution et la restitution de l'image», dans *Cours de Tunis*, vol. 1. [18](#), [20](#)
- MORETTI, J.-C. 1993, *Étude sur la nomenclature grecque de l'architecture théâtrale. ΠΙΤΑΣΟΣ et la dénomination grecque des vélums*, vol. 2, Anatolia Antiqua. [9](#)
- PLINE. 77, *Naturalis historia*, vol. XIX. [16](#)
- ROCHELEAU, M. 2010, «La modélisation 3d comme méthode de recherche en sciences historiques», dans *ACTES DU 10e COLLOQUE INTERNATIONAL ÉTUDIANT DU DÉPARTEMENT D'HISTOIRE*. [18](#), [39](#)
- 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. [5](#)

TAN, A., F. J. CROFT et F. TAN. 2014, «Simulating the construction process of the roman co-losseum using digital graphics», dans *16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMETRY AND GRAPHICS*, édité par ISGG, Innsbruch, Autriche.

VERGNIEUX, R. 2005, «Archéogrid : vers un conservatoire national des données», dans *Virtual Retrospect*, p. 157–162.

VITRUVE. -15, *De Architectura*, vol. V. 5, 8, 11

WIKIPÉDIA. 2017, «Epsilon d'une machine», URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Epsilon_d'_une_machine. 18

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

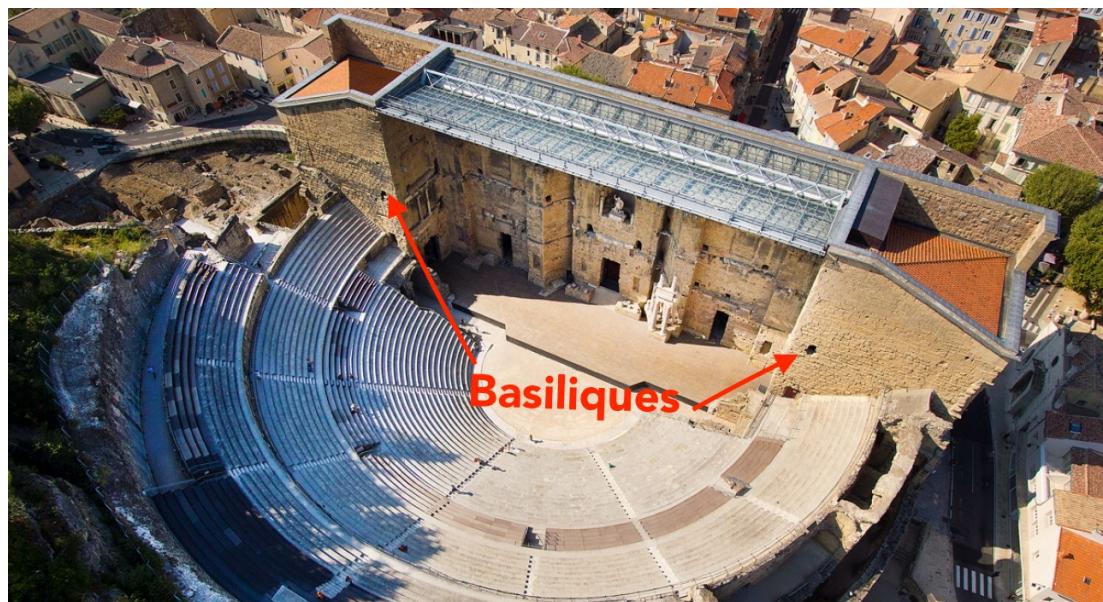
Glossaire

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 **parascaenium**



. [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](#)

PORTEAU IN SUMMA CAVEA Arcade bordée de colonnes située au dessus du troisième **maenianum**. [11, 13, 15, VI](#)

PORTEAU 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](#)