

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

<b>M. Ilde Fluck,</b>	Professeur	Examinateur
<b>M. MC Grobi,</b>	Professeur	Rapporteur
<b>Mme Dominique de Pégomas,</b>	Professeur	Examinateur
<b>M. Carton Boy,</b>	Professeur	Examinateur

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

T  
H  
E  
S  
E



# Préface de l'auteur

Cher lecteur,

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

---

# Remerciements

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

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

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

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

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

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

---

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I Modélisation du théâtre d'Orange</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1 Architecture générale du théâtre d'Orange</b>	<b>7</b>
1.1 Introduction . . . . .	8
1.2 Le postscaenium et les basiliques . . . . .	8
1.3 L'Orchestra, les aditus et la cavea . . . . .	9
1.4 Les couvertures et le velum . . . . .	12
1.5 Exemple minimal . . . . .	12
<b>2 Modélisation</b>	<b>15</b>
2.1 Introduction . . . . .	16
2.2 Le mur de scène et ses basiliques . . . . .	16
2.3 Le pulpitum et l'orchestra . . . . .	17
2.4 La colline Saint-Eutrope . . . . .	17
2.5 La cavea . . . . .	17
2.6 Maenianum . . . . .	17
2.7 Aditus . . . . .	18
<b>3 Propositions de reconstitution</b>	<b>19</b>
<b>Conclusion</b>	<b>21</b>
<b>Références</b>	<b>23</b>
<b>II Calculs acoustiques</b>	<b>25</b>
<b>Introduction</b>	<b>27</b>
<b>4 Acoustique de salle</b>	<b>29</b>
4.1 Introduction à l'acoustique de salle . . . . .	30
4.2 Méthodes de calcul acoustique . . . . .	30
4.3 Méthode couplée . . . . .	30
<b>5 Logiciel développé</b>	<b>31</b>
5.1 Introduction . . . . .	32
5.2 Lecture de maillage . . . . .	32

5.3 Calcul de rayon . . . . .	32
5.4 Calcul de sources-images . . . . .	32
5.5 Génération de réponse impulsuel . . . . .	32
5.6 Méthode d'octree . . . . .	32
5.7 Vue d'ensemble . . . . .	32
<b>6 Validation</b>	<b>33</b>
6.1 Introduction . . . . .	34
6.2 Comparaison aux cas test . . . . .	34
6.3 Analyse de complexité . . . . .	34
<b>Conclusion</b>	<b>35</b>
<b>Références</b>	<b>37</b>
<b>III Analyse acoustique du théâtre d'Orange</b>	<b>39</b>
<b>Introduction</b>	<b>41</b>
6.4 Maillage en test . . . . .	41
6.5 Materiaux . . . . .	41
<b>7 Résultats</b>	<b>43</b>
7.1 position des spectateurs . . . . .	44
7.2 Présence de spectateurs . . . . .	44
7.3 Présence de velum . . . . .	44
7.4 Forme et matériaux du toit . . . . .	44
<b>Conclusion</b>	<b>45</b>
<b>Références</b>	<b>47</b>
<b>A Annexes</b>	<b>I</b>
A.1 Figures annexes . . . . .	I
A.2 Tableaux annexes . . . . .	I
<b>B Liste des acronymes</b>	<b>III</b>
<b>C Glossaire</b>	<b>V</b>
<b>D Liste des symboles</b>	<b>VII</b>

# 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 . . . . .	10
1.3	Vue de dessus - 2ème niveau . . . . .	11
1.4	Vue de dessus - 3ème niveau . . . . .	12
1.5	Velum . . . . .	12
2.1	Repose pied et premier gradin du premier cuneus . . . . .	18
2.2	Modélisation des maenianum . . . . .	18



# Liste des tableaux

1.1 Légende courte pour l'exemple de tableau . . . . .	12
--	----



# Introduction

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

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

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



## **Première partie**

### **Modélisation du théâtre d'Orange**



# Introduction

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

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

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

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

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

---

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



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

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

# Chapitre 1

## Architecture générale du théâtre d'Orange

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

---

Auguste Perret

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>8</b>
<b>1.2</b>	<b>Le postscaenium et les basiliques</b>	<b>8</b>
<b>1.3</b>	<b>L'Orchestra, les aditus et la cavea</b>	<b>9</b>
<b>1.4</b>	<b>Les couvertures et le velum</b>	<b>12</b>
<b>1.5</b>	<b>Exemple minimal</b>	<b>12</b>
1.5.1	Exemple Tableaux et figures	12
1.5.2	Exemple Symboles mathématiques	12

---

## 1.1 Introduction

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

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

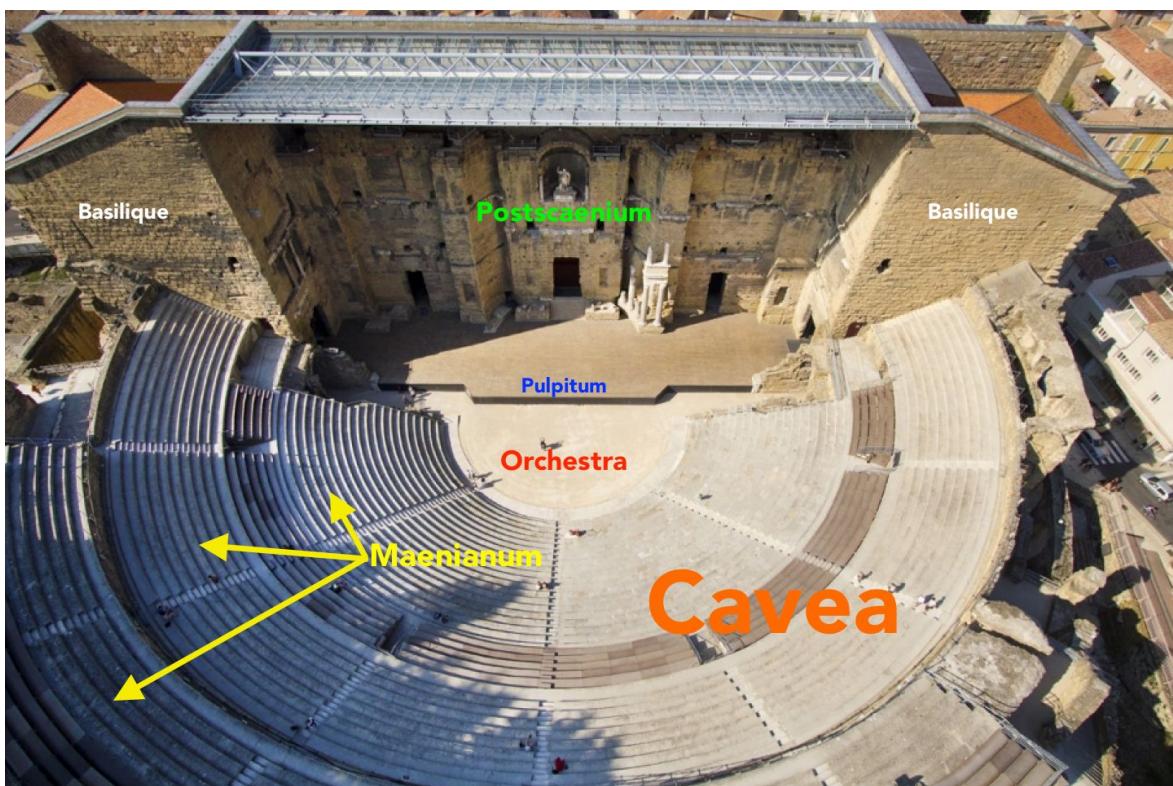


FIGURE 1.1 – Vue d'ensemble du théâtre d'Orange (cliché de Boudereaux sur [choregies.fr](#))

## 1.2 Le postscaenium et les basiliques

Le [postscaenium](#) (ou mur de scène) constituant la façade nord du bâtiment ainsi que les deux [basiliques](#) l'enclavant constituent les parties les mieux conservées du théâtre. Le [postscaenium](#) servait de décor pour les représentations et tenait probablement un rôle acoustique (voir '[Analyse acoustique du théâtre d'Orange](#)' on page 41). Les côtés est et ouest donnaient sur des rues, alors qu'adossé à la façade nord se trouvait une [Porticus post scaenam](#) servant de galerie commerçante. Celui-ci se trouvant à l'extérieur du théâtre, il ne fera pas partie de l'étude. Il donne néanmoins accès au [postscaenium](#) par le

biais de dix-sept portes reparties de manière symétrique par rapport à la porte centrale. Sur la partie haute de la façade se trouve deux séries de **consoles** ainsi qu'une assise de bouches d'eau qui permettaient d'évacuer les eaux qui tombaient sur le toit du bâtiment de scène. Les **consoles** de la série supérieure (mis à part les deux situées aux extrémités) présentent un trou traversant permettant d'accueillir le mât. Celles de la série inférieure sont creusées à leur lit d'attente d'une grande mortaise circulaire prolongée par un petit trou permettant l'écoulement de l'eau de pluie. Pour pouvoir placer un mât dans un couple **consoles** il fallait également que l'assise de bouche d'eau soit percée. Or cela n'est le cas que pour douze emplacements correspondant aux mâts nn° 4 à 9 à partir des deux extrémités du mur. Il semble que les mâts n'aient été présents qu'à ces emplacements, c'est à dire au niveau des **basiliques** et non du mur de scène pour soulager ce dernier d'une trop forte tension liée au poids du **velum**. L'intérieur du **postscaenium** comporte huit pièces donnant uniquement sur la **Porticus post scaenam** à l'extérieur du théâtre. Trois portes dont la porte royale donnent directement accès à la scène. Deux portes de part et d'autre amène aux **basiliques** et une au **parascaenium** et à des escaliers permettant de monter aux étages supérieurs. À l'intérieur du **postscaenium**, en plus du rez-de-chaussé et des combles, on compte deux étages assurés par la présence de baies à arcature permettant de passer d'une pièce à l'autre à l'intérieur du mur. Cela permettait aux acteurs d'accéder à des niches traversante en hauteur pour faire apparaître par exemple des personnages divins ou effectuer des bruits de tonnerre.

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

Le mur de façade du bâtiment de scène est flanqué de part et d'autre de deux **basiliques** de forme presque carrée auxquelles on accède depuis la scène par une grande porte rectangulaire et un **parascaenium**. Les **basiliques** servaient à entreposer des décors volumineux et permettaient l'entrée des artistes. Elles donnaient également accès à l'extérieur ou aux **aditus** par un couple de baies à arcature.

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

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

Depuis l'extérieur du théâtre on accède à ce lieu par deux larges *parodos* formant les *aditus*. Chacune est composée d'une succession de trois voûtes en décrochement qui portaient les tribunes et les extrémités de la *cavea*.

La *cavea*, telle qu'elle a été restaurée, comprend trois hémicycles appelés *maenianum*, séparée l'un de l'autre par une *precinctio* et un *podium*. Cela a été déduit par Caristie de par la forme des *aditus*, les vestiges du premier gradin et de la première *precinctio* et reconstruit en ce sens par Formigé. Chaque *maenianum* est divisé en un certains nombre de sections appelées *cuneus* par des escaliers. Le premier *maenianum*, ou *ima cavea* séparé en quatre *cuneus*, comprend un repose-pied à sa base et vingt gradins. Au niveau de la première *precinctio* neuf ouvertures donnent sur un couloir souterrain (premier *ambulacre*). Ce dernier est accessible depuis l'extérieur du théâtre au rez-de-chaussée par deux escaliers longeant les *aditus*. Le couloir ouvre aussi sur dix-huit pièces aveugles, mais seule les salles numérotées de 1 à 8 (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.

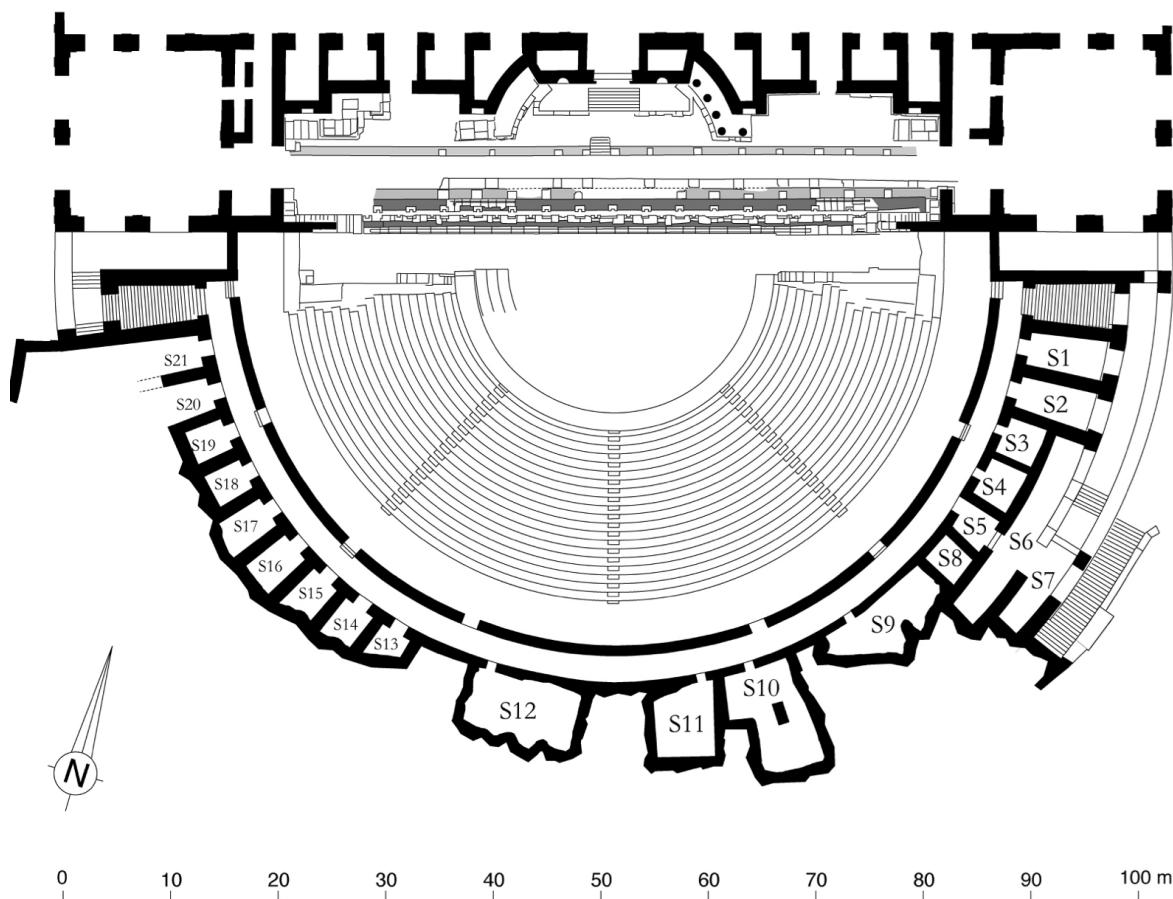


FIGURE 1.2 – Plan du théâtre au niveau du premier ambulacre [BADIE et collab., 2013a, Pl. XVII]

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 comporte, entre deux circulations horizontales peu profondes, neuf gradins divisés en huit *cuneus* par neuf escaliers. On accède à son niveau supérieur par une série de passages radiaux reliés à un second couloir annulaire, dont la paroi extérieure s'identifie au

mur périphérique du théâtre. Cinq de ces passages, qui devaient être neuf dans l'Antiquité, sont aujourd'hui utilisables. Le couloir est souterrain dans la zone où la cavea est adossée et construit sur deux niveaux de chambres voûtées dans sa partie la plus orientale. Il est directement accessible de l'extérieur par une porte à l'est et une autre à l'ouest.

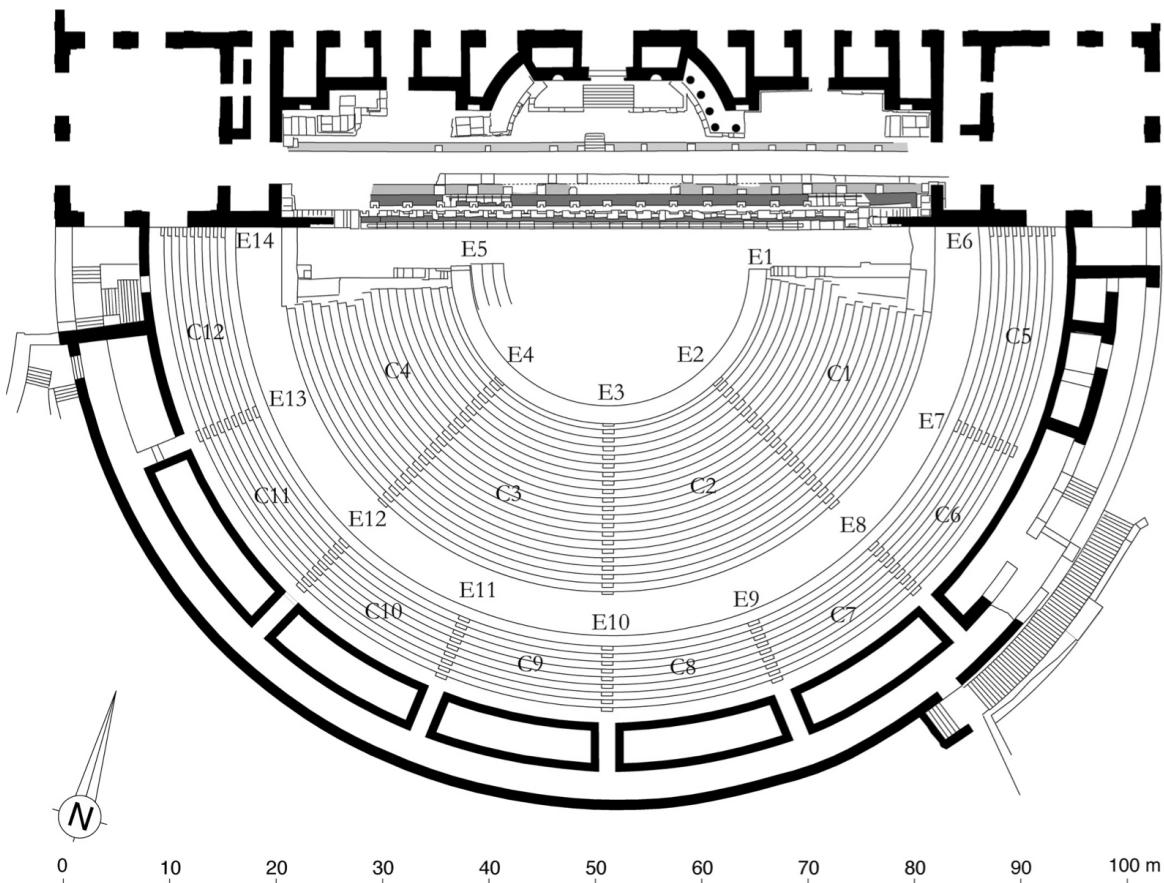


FIGURE 1.3 – Plan du théâtre au niveau du second ambulacre [BADIE et collab., 2013a, Pl. XVIII]

Le troisième maenianum, ou summa cavea, est entièrement construit sur structure creuse. Il comporte cinq gradins à l'origine divisés par neuf escaliers. Il est couronné par une plate-forme aménagée au-dessus du second couloir annulaire. Celle-ci était jadis occupée par un portique, une porticus in summa cavea, dont la reconstruction partielle de deux colonnes évoque la présence. Dans sa partie centrale, le mur périphérique de la cavea est percé de portes donnant accès au portique et à la summa cavea à partir du chemin qui borde l'édifice à sa périphérie. Les portes sont axées sur les escaliers de la cavea.

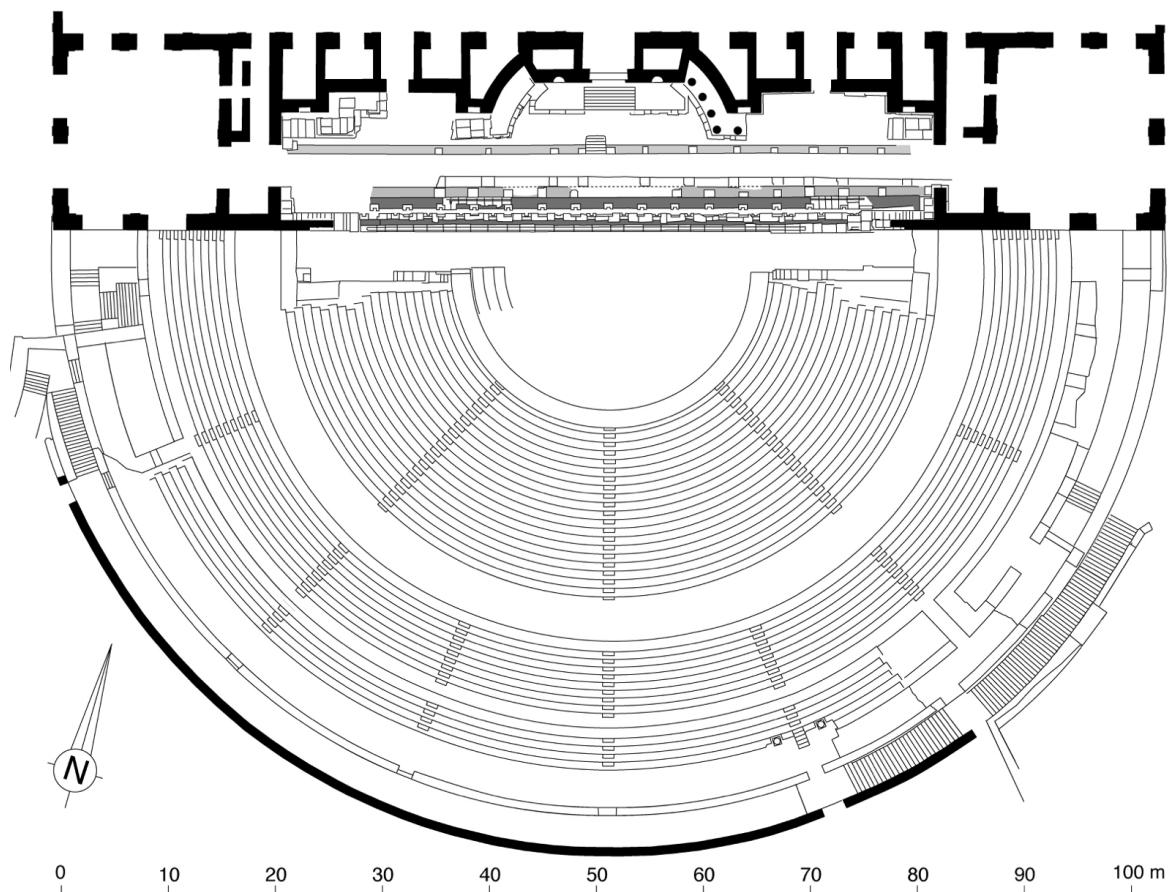


FIGURE 1.4 – Plan du théâtre au niveau de la rue périphérique [BADIE et collab., 2013a, Pl. XIX]

## 1.4 Les couvertures et le velum

FIGURE 1.5 – proposition de restitution du velum d'Orange par A.Caristie

## 1.5 Exemple minimal

### 1.5.1 Exemple Tableaux et figures

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

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

Coucou	Au revoir
maman	papa

### 1.5.2 Exemple Symboles mathématiques

Rien de spécial à propos des math, hormis l'illustration des symboles listés en fin de document, tels  $\alpha$  ou  $\gamma$ , qui peuvent être utilisés indifféremment en mode *in-line* ou dans des équations<sup>1</sup> :

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

Les entrées des glossaires peuvent même être appelés dans des figures (PDF avec surcouche L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, ou TikZ).

---

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



# Chapitre 2

## Modélisation

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

---

Léonard de Vinci

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Le mur de scène et ses basiliques</b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Le pulpitum et l'orchestra</b>	<b>17</b>
<b>2.4</b>	<b>La colline Saint-Eutrope</b>	<b>17</b>
<b>2.5</b>	<b>La cavea</b>	<b>17</b>
<b>2.6</b>	<b>Maenianum</b>	<b>17</b>
<b>2.7</b>	<b>Aditus</b>	<b>18</b>

---

## 2.1 Introduction

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

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

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

## 2.2 Le mur de scène et ses basiliques

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

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

corrigé par les archéologues dans une prochaine étape.

## 2.3 Le pulpitum et l'orchestra

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

## 2.4 La colline Saint-Eutrope

Comme souvent les architectes de l'époque ont adossé la cavea sur un relief naturel afin de solidifier la structure et de simplifier la construction de l'édifice. La colline Saint-Eutrope qui soutient donc le théâtre sur sa partie méridionale a été modélisée d'après les lignes d'altitude (référencées page 11 ?) à partir de la plus basse jusqu'à la plus haute par pas de 6m par extrusion successive. Les élévation ont ensuite été légèrement adaptée (ligne par ligne) 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.

## 2.5 La cavea

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

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

## 2.6 Maenianum

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

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



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

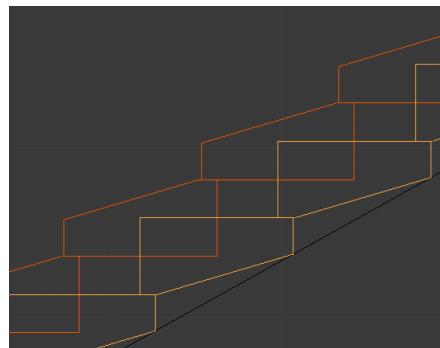


FIGURE 2.2 – Modélisation des maenianum et de l'emprunte des escaliers à retirer apres application des modifiers Array et Screw

## 2.7 Aditus

# Chapitre 3

## Propositions de reconstitution

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

---

Abraham Lincoln



# **Conclusion**



# Références

- BADIE, A., M. FINCKER, J.-C. MORETTI, L. RABATEL, E. ROSSO et D. TARDY. 2013a, «Le théâtre d'orange - rapport final d'opération - planches», PACA Vaucluse, Orange Théâtre antique 84 087 0031 - Patriarche 9827 n2012-203. [8](#), [10](#), [11](#), [12](#)
- BADIE, A., M. FINCKER, J.-C. MORETTI, L. RABATEL, E. ROSSO et D. TARDY. 2013b, «Le théâtre d'orange - rapport final d'opération - texte», cahier de recherche. PACA Vaucluse, Orange Théâtre antique 84 087 0031 - Patriarche 9827 n2012-203. [8](#)
- BADIE, A., J.-C. MORETTI et D. TARDY. 2007, «Pouvoir du théâtre et théâtre du pouvoir. nouvelles recherches sur le théâtre d'orange», *Archéopages*. [5](#)
- 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](#)
- VITRUVE. -15, *De Architectura*, vol. V. [5](#), [8](#)



# **Deuxième partie**

## **Calculs acoustiques**



# **Introduction**

---

# Chapitre 4

## Acoustique de salle

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

---

Georges Brassens

## **4.1 Introduction à l'acoustique de salle**

Livre de Jouhaneau

## **4.2 Méthodes de calcul acoustique**

### **4.2.1 FEM/BEM**

### **4.2.2 RayTracing**

### **4.2.3 Sources-image**

### **4.2.4 Statistique**

## **4.3 Méthode couplée**

# **Chapitre 5**

## **Logiciel développé**

« *Sucette à la viande* »

---

MC Grobi

## **5.1 Introduction**

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

## **5.2 Lecture de maillage**

## **5.3 Calcul de rayon**

## **5.4 Calcul de sources-images**

## **5.5 Génération de réponse impulsional**

## **5.6 Méthode d'octree**

## **5.7 Vue d'ensemble**

Add-on blender, traitement du signal, etc

# **Chapitre 6**

## **Validation**

« *Areuh* »

---

Iilde Flucki

## **6.1 Introduction**

Rappel cahier des charges

## **6.2 Comparaison aux cas test**

### **6.2.1 Salle rectangulaire**

### **6.2.2 Salle sphérique**

## **6.3 Analyse de complexité**

# **Conclusion**



# Références



## **Troisième partie**

### **Analyse acoustique du théâtre d'Orange**



# **Introduction**

**6.4 Maillage en test**

**6.5 Materiaux**



# Chapitre 7

## Résultats

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

---

Georges Brassens

### Sommaire

---

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

---

## **7.1 position des spectateurs**

**7.1.1 Devant**

**7.1.2 Derrière**

**7.1.3 Jardin**

**7.1.4 Cours**

## **7.2 Présence de spectateurs**

## **7.3 Présence de velum**

## **7.4 Forme et matériaux du toit**

# **Conclusion**



# Références



# **Annexe A**

## **Annexes**

### **A.1 Figures annexes**

  Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper. On rappelle que  $\alpha$  et  $\gamma$  sont liés par la relation (1.1). Pour plus de détails, voir page 13.

### **A.2 Tableaux annexes**

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



# **Annexe B**

## **Liste des acronymes**

**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. [5, 8](#)

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

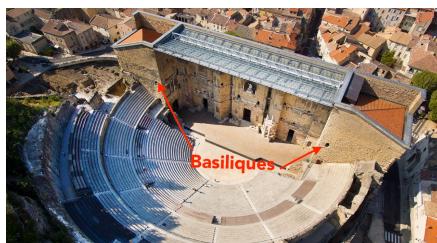
**UPMC** Université Pierre et Marie Curie. [1](#)



# Annexe C

## Glossaire

**ADITUS** Portes conduisant de l'extérieur à l'**Orchestra**. v, 7, 9



Large pièce de forme quasi-carré qui flanke le mur de scène et les **parascaenium**. v, 7–9, V

**CAVEA** Désigne l'ensemble des rangées concentriques composant les gradins. v, 5, 7–9, V

**CONSOLE** Pièce de maçonnerie servant à supporter les mâts du **velum**. 8

**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 renflement souvent semi-circulaire ou rectangulaire. 9

**HYPOSCAENIUM** Fosse situé sous la scène comportant notamment le mécanisme du rideau de scène. 5

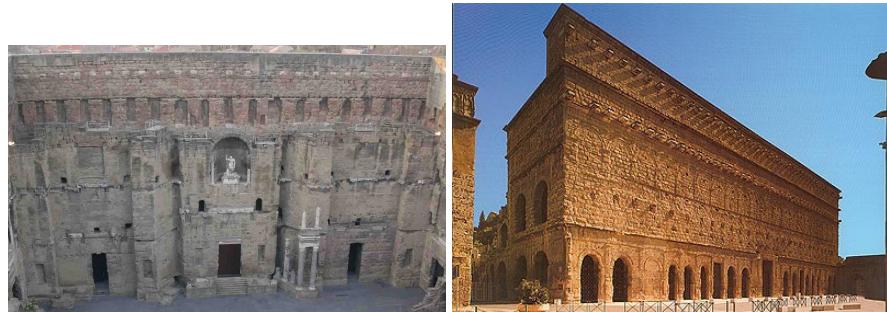
**ODÉON** Petit théâtre couvert dédié exclusivement aux spectacles musicaux. 8

**Orchestra** Espace semi-circulaire (chez les romains) ou circulaire (chez les Grecs) se situant entre la scène et le premier gradin. v, 7, 9, V

**PARASCAENIUM** Espace intermédiaire entre la scène et les **basiliques** comportant des escaliers pour atteindre les niveaux supérieurs. 8, 9, V

**Porticus post scaenam** Arcade bordée de colonnes située à l'extérieur du théâtre et adossée au mur de scène. 8

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



. [v](#), [7](#), [8](#)

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

## **Annexe D**

### **Liste des symboles**

$\alpha$  Angle de d'attaque de la molette. [10](#), [I](#)

$\gamma$  Angle de dépouille de la molette. [10](#), [I](#)