KU LEUVEN

ARENBERG DOCTORAL SCHOOL
FACULTY OF ENGINEERING SCIENCE



Voûtes à Nervures Manuélines

Le Caractère Innovant de João de Castilho

Volume I

Soraya Genin

Supervisor:
Prof. Dr. Krista De Jonge
Prof. Dr. José Carlos Palacios Gonzalo

Dissertation presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor in Engineering

June 2014

VOÛTES À NERVURES MANUÉLINES
LE CARACTÈRE INNOVANT DE JOÃO DE CASTILHO

Soraya GENIN

Supervisors:
Prof. Dr. Krista De Jonge (KU Leuven)
Prof. Dr. José Carlos Palacios Gonzalo (UP Madrid)

Members of the Examination Committee:
Prof. Dr. Rafael Moreira (assessor) (FCSH-UN Lisboa)
Prof. Dr. Koenraad Van Balen (assessor) (KU Leuven)
Prof. Dr. Norbert Nussbaum (U Köln)
Prof. Dr. Santiago Huerta Fernández (UP Madrid)
Prof. em. Dr.Luc Verpoest (KU Leuven)

Dissertation presented in
partial fulfillment of the
requirements for the degree
of Doctor in Engineering

June 2014

Funded by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia

© 2014 Katholieke KU Leuven – Faculty of Engineering
Uitgegeven in eigen beheer, Soraya Genin, Travessa de Santa Rita 61A, 2765-353 São João do Estoril (Portugal)

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm, elektronisch of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of the publication may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm, electronic or any other means without written permission from the publisher.

ISBN 978-94-6018-866-4
D/2014/7515/90

Pour Maïté, Cloé

et Frédéric

Remerciements

À l'heure où la rédaction de cette thèse de doctorat prend fin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont accompagnée, conseillée et soutenue tout au long de ma recherche, particulièrement mes promoteurs de thèse :

Le professeur Krista de Jonge, de Louvain, qui m'a dirigée sur ce long chemin et qui m'a soutenue avec confiance jusqu'à la fin. Elle m'a transmis son esprit de méthodologie, le plaisir de la découverte et la créativité de l'écriture scientifique. Je retiens particulièrement les moments d'enthousiasme que nous avons partagés lors de la rédaction de l'article que nous avons présenté au congrès de Cottbus sur les églises-halles manuélines.

Le professeur José Carlos Palacios Gonzalo, de Madrid, qui m'a tout appris sur le tracé et sur la construction des voûtes. Lors des différents congrès auxquels nous avons participé, notamment en Espagne, il m'a toujours spontanément transmis ses communications, ses articles, ses photos, les documents dont il disposait. Il m'a initiée à la pratique de la taille de pierres dès la première année de cette recherche, lors de son cours pratique à Madrid en 2007 : *El arte de la piedra. Teoría y práctica de la cantería*. Il y eut également en 2013 la construction d'une maquette 1:3 de la voûte de la sacristie de Jerónimos, passionnant exercice d'application des systèmes constructifs nervurés.

Je suis reconnaissante au professeur Rafael Moreira, de Lisbonne, pour les connaissances qu'il m'a transmises sur João de Castilho. Depuis ma thèse de maîtrise sur Jerónimos, j'avais lu le chapitre qu'il lui a consacré dans sa thèse de doctorat. Nous avions visité ensemble la région ou Castilho est né et nous avons visité les églises où il a été formé, lors de notre voyage pour la présentation de notre article à Santander. Je le remercie notamment de m'avoir montré le village natal de João lors du voyage que nous avons fait en voiture dans les montagnes de Santander, à Rubalcava.

Le professeur Koen Van Baelen, de Louvain, pour ses conseils avisés sur la portée de la thèse, ainsi que pour la bibliographie très complète qu'il m'a indiquée concernant la construction des voûtes, quand il était mon directeur de thèse de maîtrise.

En Espagne, je tiens à remercier les professeurs Enrique Rabasa Díaz et Santiago Huerta, de Madrid, pour leurs réponses toujours prévenantes et attentives à mes questions. J'ai beaucoup appris avec Rabasa, toujours attentif à mes questions pendant toutes ces années lors des congrès et à chaque fois que j'allais à l'UPM à Madrid. J'ai eu le plaisir de recevoir l'opinion avisée de Huerta sur l'église de Jerónimos lors d'une visite que nous y avons effectuée ensemble.

Le professeur Begoña Alonso Ruiz, que je remercie pour son accueil à Santander et pour toute la bibliographie qu'elle m'a envoyée sur les architectes de la région natale de Castilho.

Les professeurs Arturo Zaragozá et Catalán José Calvo López pour les conversations passionnantes que nous avons eues ensemble lorsque nous rencontrions à l'occasion de congrès.

En Allemagne, le professeur David Wendland, pour la chaleur de

son accueil, pour les personnes à qui il m'a présentées et pour les réunions qu'il a préparées en particulier avec les professeurs Bruno Klein et Stefan Bürger, que je remercie pour sa disponibilité pour m'expliquer les parties de son livre consacrées aux voûtes allemandes, palliant ma méconnaissance de la langue. Je me souviens de la visite au château Albrechtburg à Meissen, qu'il a guidée avec beaucoup d'émotion pour nous dévoiler ces nervures aux formes d'un dynamisme surprenant et où j'ai pu comprendre cette architecture, si caractéristique des pays d'Europe centrale.

Le professeur Jacques Heyman, pour son accueil lors du congrès à Cottbus, son indéfectible disponibilité.

Les professeurs Giuseppe Fallacara et Luc Tamborero, pour m'avoir transmis leur expérience sur la taille de la pierre lors de séminaires pratiques à Madrid, et à Lisbonne où je les avais invités à l'atelier de construction en pierre que j'ai organisé en mai 2012.

J'ai également une pensée émue pour le regretté professeur Docteur Manuel Mendes Atanázio (1927-1992). C'est lui qui, lors de ses cours d'Histoire de l'Art à Lisbonne, m'a fait découvrir la pertinence de la problématique des voûtes manuélines et à qui je lui dois mon intérêt pour ces voûtes tellement originales. Ses yeux brillaient à chaque fois qu'il en parlait et c'est lui qui m'a demandé, à moi, la seule architecte de son cours cette année-là, de poursuivre la recherche. Il me dit : « On a besoin de vous, il faut faire d'autres études sur l'architecture, des sondages, des relevés ! » Et c'est ce que j'ai voulu faire depuis, portée par sa conviction. La dernière fois que je l'a vu, nous étions justement à Jerónimos : m'expliquant encore un fois ses idées, il me fit un dessin de la structure des voûtes de l'église, dessin reproduit dans l'introduction de la présente thèse.

Tout au long de ces années, avant même que se soit formé en moi le projet du présent doctorat, j'ai également pu compter sur mes coreligionnaires de longue date que sont Teresa Patricio et Jean Marc Basyn qui ont su m'entourer de leur expérience et de leur amitié aussi prévenante qu'avisée. Je les remercie d'avoir relu et corrigé mes textes. Je remercie aussi Ana Assis Pacheco qui a revu mes textes sur João de Castilho et Sarah Moutury de m'avoir poussé à suivre mes convictions concernant les typologies des voûtes.

Et enfin, je remercie tous les membres de ma famille, pour leur patience, leur affection et leur soutien, jour après jour.

Mon père, pour sa constante disponibilité pour se rendre aux quatre coins du pays pour effectuer des relevés de voûtes, et pour le précieux apport de son expérience technique. Ma mère et mes tantes, sur l'affection et le soutien desquelles j'ai toujours pu compter.

Ma sœur Gilda Monteiro, pour son intervention inventive et essentielle dans la mise en page d'ensemble de cette thèse.

Mon mari, pour avoir patiemment traduit, corrigé et relu mes textes en français, et pour son regard aussi critique que bienveillant.

Mes enfants, joyeux et patients compagnons de mes voyages d'étude.

Autant de personnes sans qui la présente thèse ne serait pas ce qu'elle est.

Préface

L'église Santa Maria de Belém du monastère des Hiéronymites (église de Jerónimos), est un remarquable exemple d'architecture du gothique final de par la forme et portée de ses voûtes nervurées, envisageant l'unité spatiale recherchée partout en Europe.

La voûte de la nef présente une forme de berceau d'une largueur de 22,40 m. Reposant sur deux rangées de colonnes, elle est dépourvue d'arcs marquant visuellement la séparation des nefs et des travées. Elle présente ainsi une surface ininterrompue, tant transversalement que longitudinalement.

Le transept est recouvert d'une voûte unique de 28,80 m x 19,00 m, sans appui intermédiaire.

Les formes de ces deux voûtes ont pu être obtenues grâce à des réseaux de nervures composées (terme que nous avons créé pour définir les nervures droites en plan, composées de plusieurs segments), et des *combados* (mot espagnol désignant les nervures courbes au sommet de la voûte).

Dans notre thèse de maîtrise, nous avions attribué à l'architecte João de Castilho la conception et la construction de ces deux voûtes en nous basant sur des sources historiques et surtout sur des analyses architecturales que nous avions effectuées (MONTEIRO, Soraya, 1995). Les résultats de l'analyse architecturale ont été extrêmement instructifs pour la question de l'attribution de la voûte et pour la connaissance de l'architecture des voûtes à nervures, notamment les méthodes de conception et de construction : tout cela nous a amenés à pousser plus loin nos recherches sur João de Castilho, sur Jerónimos et sur les voûtes à nervures en général.

À la suite de notre thèse de maîtrise, nous avons eu l'occasion de coordonner, pour l'Institut du Patrimoine Portugais (IPPAR), deux projets de conservation portant sur les voûtes de l'église de Jerónimos et du cloître hospitalier du couvent de Christ à Tomar, toutes deux de Castilho. Ces projets ont produit des résultats très importants et pertinents, notamment grâce aux relevés et aux sondages réalisés à l'extrados des voûtes de Jerónimos. Nous avons eu encore récemment l'occasion d'obtenir de nouvelles données sur l'intrados de la voûte de la nef, en tant que consultante pour les travaux de restauration actuellement en cours, lancés par l'actuelle Direction Générale de la Culture portugaise (l'ancien IPPAR).

Cette connaissance de plus en plus approfondie nous a amenés à nous poser des questions elles aussi plus vastes. Nous avons éprouvé le besoin d'élargir nos cas d'études pour définir plus précisément la spécificité de l'architecte João de Castilho au regard du contexte portugais et européen, et, plus généralement, la construction des voûtes à nervures. Les voûtes françaises, espagnoles, anglaises et allemandes font actuellement elles aussi l'objet de plusieurs études portant sur les questions architecturales et structurelles.

Les voûtes portugaises souffrent quant à elles d'un manque d'études techniques et elles n'ont été considérées jusqu'à présent que comme un objet d'Histoire de l'Art, lacune que nous voulons ici combler, pour la première fois pensons-nous, avec cette étude plus technique

et plus systématique.

Ce fut Mendes Atanázio qui a suggéré à l'auteur le sujet de ses deux thèses (la thèse de maîtrise et le présent doctorat) et qui l'a encouragée, par son enthousiasme communicatif d'enseignant, à poursuivre les études sur le sujet.

Cette recherche a été financée au Portugal par la *Fundação para a Ciência e a Tecnologia*, à travers son programme *Programa Operacional da Ciência e Inovação 2010* soutenu par Fond Social Européen, ce qui nous a permis d'entreprendre au Portugal un important travail sur place pour effectuer des relevés, et de nous rendre en Espagne, en Angleterre et en Allemagne pour analyser sur place les voûtes à nervures.

À l'occasion de la présente étude menée en contexte international, de nos publications et de nos communications faites lors de congrès importants abordant l'Histoire de la construction, nous avons pu constater un intérêt naissant pour les questions techniques touchant aux voûtes portugaises, en particulier celles du monastère de Jerónimos à Lisbonne. Des études dans les domaines de la structure et de l'architecture gothiques portugaises ont ainsi été lancées, au Portugal par Paulo Lourenço à l'Université de Minho et, en Italie, par Giuseppe Fallacara de l'Université Polytechnique de Bari, où nous co-orientons actuellement une thèse de doctorat sur les voûtes à nervures au Portugal.

Nous espérons que l'architecture portugaise, qui était quelque peu oubliée dans la bibliographie internationale, se verra désormais mieux reconnue dans l'histoire de la construction. Nous osons également croire que cette thèse de doctorat y aura contribué.

Abstract

This thesis examines Portuguese ribbed vaults from the Manueline period (end of the fifteenth and beginning of the sixteenth century), with particular reference to those of architect João de Castilho. His vaults of the nave and transept of the Jeronimos Monastery are the best examples from historical, architectural and structural perspectives.

The multidisciplinary content of this subject follows the research, the issues it addresses, the methodological approach employed and the results obtained.

Historical issues include the originality of the Jeronimos Monastery and Manueline architecture in the European context on the one hand, and its authorship in a Portuguese context on the other. Structural issues relate to the behaviour of these large span vaults and the barrel form, abandoned in Gothic architecture because of the important stresses distributed through walls, and the polemic surrounding the ribs function. The chief issue concerns architecture, and the geometry used in elevation and in the creation of these forms, as well as on a broader scale, the methods of design and construction of ribbed vaults.

The structure of the thesis reflects the research method used:

Chapter 1 analyses the historical sources of João de Castilho's vaults and verifies the attributions, based on bibliography and information furnished by original documents. His origin and training are important to understand his culture.

Chapter 2 enlarges the object of study to understand the Gothic ribbed vaults. The methods of planning and construction of the vault that are applied in subsequent chapters are studied. It explores the influences on and originality of Castilho's architecture. Analysis focusses on Spain (the origin of Castilho and type of curvilinear ribbed vaults), Germany and Central Europe (known for its *Hallenkirche*) and England (similarity in form and structure to the fan vaults). To understand the Manueline and the particularity of Castilho, a database of vaults was made, and a typology of ribbed vaults created. This typology is based on the types of ribs, and not only, as is customary, on their form, with the specific objective of understanding the different roles of the rib. This led to the creation of a new term, namely, the compound rib.

Chapter 3 presents an analysis of details and structure of two barrel vaults by Castilho; the nave of the Jeronimos Monastery and a cloister of the Convent of Christ in Tomar in order to arrive at a deeper understanding of the behaviour of the structures and the function of the ribs based on surveys, finite elements analysis, and contemporary structural rules.

The last chapter analyses the vault's design and construction in 44 mapped case studies, drawing primarily on works by João de Castilho. Efforts to understand more precisely the principles in use at the time contribute substantially to answering the question posed at the outset: How can we identify João de Castilho's vaults? The final chapter introduces new ideas on the methods for planning and

construction of ribbed vaults.

Beknopte samenvatting

Dit onderzoek betreft de Portugese ribgewelven in Manuelstijl (eind van de vijftiende en begin van de zestiende eeuw), en in het bijzonder de gewelven van architect Joao de Castilho. Zijn gewelven van het schip en het dwarsschip van de kerk van het klooster van Jeronimos zijn de beste voorbeelden in tegelijk de historische, architecturale als structurele aspecten.

Ons onderzoek is multidisciplinaire, door de te overwegen doelstellingen, de toegepaste methodologie en de bereikte resultaten.

De historische achtergrond wordt enerzijds aangehaald aan de hand van de originaliteit van Jeronimos en Manuelstijl in de Europese context, en anderzijds met zijn auteursschap in een Portugees verband. De structurele vragen hebben betrekking met het gedrag van gewelven met grote overbrugging en de tonvorm, dat verlaten werd door de gotiek omwille van de belangrijke duwdrukken die door de muren worden verspreid, en de polemiek over de functie van de nerven of boogribben. Onze voornaamste doeleinde betreft architectuur, de geometrie die specifiek wordt gebruikt in de opbouw en de verwezenlijking van deze vormen en, in een bredere schaal, de methodes van ontwerp en bouw van ribgewelven.

De structuur van de thesis weerspiegelt de gebruikte methode voor dit onderzoek:

Hoofdstuk 1 analyseert de historische bronnen van Joao de Castilho's gewelven, om de echtheid van toekenning na te gaan, gebaseerd op bibliografie en originele documenten. Zijn oorsprong en opleiding zijn ook belangrijk om zijn cultuur te begrijpen.

Hoofdstuk 2 verbreedt het onderwerp van het onderzoek om de Gotische ribgewelven beter te begrijpen. De ontwerpmethodes en gewelvenbouw die in de volgende hoofdstukken worden behandeld worden hier bestudeerd. Het onderzoekt de invloeden en de originaliteit van de architectuur van Castilho. We hebben in het bijzonder Spanje (oorsprong van Castilho en type van gebogen ribgewelven), Duitsland en Centraal-Europa (gekend omwille van de Hallekirche) en Engeland (gelijksoortigheid in vorm en structuur van waaiergewelven) doorgelicht. Er werd een database van gewelven opgemaakt om de Manuelstijl en in het bijzonder Castilho te doorlichten. Deze typologie is gebaseerd op de types nerven, en niet enkel op hun vorm zoals meestal het geval is, met als doelstelling de verschillende functies van de nerven te begrijpen.

Hoofdstuk 3 stelt een analyse voor van details en structuur van twee tongewelven van Castilho, het schip van Jeronimos en één van de kloostergangen van het klooster van Christus in Tomar. Het is onze bedoeling het gedrag van de structuren en de functie van de nerven te omsluiten, ondersteund door opmetingen, analyse van eindige elementenmethode en hedendaagse structuurregels.

In het laatste hoofdstuk worden het ontwerp van de gewelven en de bouw van 44 case studies die we op kaart brengen geanalyseerd, de meeste van de hand van Joao de Castilho. We hebben getracht de principes die in zijn tijd in gebruik waren beter te begrijpen om de vraag die we in het begin van dit onderzoek stellen te beantwoorden:

hoe kunnen we de gewelven van Joao de Castilho identificeren? Dit hoofdstuk brengt ook nieuwe ideeën over de conceptie en de bouw van ribgewelven.

VOÛTES À NERVURES MANUÉLINES
LE CARACTÈRE INNOVANT DE JOÃO DE CASTILLO

Table des matières

VOLUME I

Remerciements i
Préface iii
Abstract v
Beknopte samenvatting vii
Table des matières ix
Abbreviations xvii
Liste des figures xix
Liste des tableaux xxix
Liste des annexes xxxi
INTRODUCTION 1
Questions historiques 1
Questions structurelles et constructives. 4
Questions architecturales - Le tracé et la construction 6
Méthodologie et structure de la thèse 9

1. JOÃO DE CASTILHO ET SON ŒUVRE 13
1.1 Cadre historique et culturel 13
1.2 Origine, formation et influences artistiques. 18
1.3 Églises et cathédrales 23
1.3.1 Cathédrale de Braga 23
1.3.2 Église du couvent de Jésus à Setúbal 25
1.3.3 Église São Salvador du monastère de Vilar de Frades 28
1.3.4 Église São João Baptista de Vila do Conde 30
1.3.5 Cathédrale de Viseu 32
1.3.6 Église São Miguel de Freixo de Espada-à-Cinta 33
1.3.7 Église Nossa Senhora da Assunção d'Arronches 34
1.3.8 Église matrice de Torre de Moncorvo 35
1.4 Ouvrages monastiques 36
1.4.1 Monastère Santa Maria d'Alcobaça 36
1.4.2 Monastère Santa Maria da Vitória de Batalha 37
1.4.3 Monastère de Jerónimos de Lisbonne 39
1.4.4 Couvent du Christ à Tomar 46
1.5 Autres ouvrages attribués 52
Conclusions 58
2. VOÛTES À NERVURES GOTHIQUES 65
2.1 Introduction 65

2.2 Tracé et construction – État de la question 68
2.2.1 Plan et élévation 68
2.2.2 Le tracé des voûtes 76
2.2.3 Espagne 99
2.3 Portugal – Typologie des voûtes 118
2.3.1 Considérations terminologiques 118
2.3.2 Classement des voûtes par type 123
2.3.2.1 Voûtes d'ogives 124
2.3.2.2 Voûtes à tiercerons 126
2.3.2.3 Voûtes à liernes 128
2.3.2.4 Voûtes à *combados* 131
2.3.2.5 Voûtes à nervures composées 134
2.3.3 Les églises-halles 139
2.3.4 Tableau de classification et plans de localisation des voûtes analysées 145
Conclusions 118
3. DETAILS CONSTRUCTIFS ET ANALYSES STRUCTURELLES 163
3.1 Introduction 163
3.2 Église du monastère de Jerónimos : voûtes de la nef et du transept 164
3.2.1 Données d'archives 164
3.2.2 Données des sondages à l'extrados 169

3.2.3 Plan et élévation ... 172
3.2.4 Les nervures ... 176
3.2.5 Les tas de charge ... 181
3.2.6 Les voûtains ... 184
3.2.7 Les clefs ... 187
3.2.8 Les colonnes ... 188
3.2.9 Dégradation des matériaux ... 189
3.2.10 Relevé de la verticalité des murs et des colonnes ... 191
3.2.11 Évaluation de la stabilité par la méthode des éléments finis ... 191
3.3 Cloître hospitalier du couvent du Christ à Tomar ... 193
3.3.1 Description des voûtes ... 193
3.3.2 Détails constructifs ... 194
3.3.3 Déformations verticales et horizontales ... 195
3.3.4 Analyse géométrique des déformations ... 196
3.3.5 Analyse de stabilité par la méthode des éléments finis ... 197
Conclusions ... 201
4. CAS D'ETUDES. TRACÉ ET CONSTRUCTION ... 205
Introduction ... 205
4.1 Monastère de Jerónimos : Construction d'une voûte à nervures. Réalisation de la maquette de la sacristie. ... 209
4.2 Cathédrale de Braga ... 221

4.2.1 Chœur 221
4.2.2 Porche 225
4.3 Église du couvent de Jésus de Setúbal 227
4.3.1 Chœur 227
4.3.2 Nef 231
4.4 Église matrice de Vila do Conde 233
4.4.1 Chœur 233
4.4.2 Chapelles du chœur et chapelle de la nef 237
4.5 Monastère de Vilar de Frades 239
4.5.1 Chœur 239
4.5.2 Croisée 244
4.5.3 Chapelle du transept gauche 247
4.5.4 Nef 250
4.6 Église du couvent de São Francisco, à Porto 253
4.6.1 Chapelle de Carneiros 253
4.7 Cathédrale de Viseu 255
4.7.1 Nef 255
4.7.2 Narthex 259
4.8 Église matrice de Freixo de Espada-à-Cinta 263
4.8.1 Nef 263

4.8.2 Chœur 267
4.8.3 Chapelle gauche du chœur 270
4.9 Église de Misericordia à Freixo de Espada-à-Cinta 271
4.9.1 Chœur 271
4.10 Église matrice d'Arronches 275
4.10.1 Nef 275
4.10.2 Chapelle droite de la nef 278
4.10.3 Chapelle droite du chœur 280
4.10.4 Narthex 281
4.11 Église de Misericordia d'Arronches 282
4.11.1 Nef 282
4.11.2 Chœur 284
4.12 Église de Torre de Moncorvo 285
4.12.1 Nef 285
4.13 Église de Marvila 288
4.13.1 Chœur 288
4.13.2 Chapelle gauche 291
4.14 Monastère d'Alcobaça 293
4.14.1 Voûte du passage vers la sacristie 293
4.15 Monastère Santa Maria da Victória, Batalha 298

4.15.1 Voûte tournante....298
4.16 Couvent du Christ, à Tomar....303
4.16.1 Église....303
4.16.2 Cloître Santa Bárbara....307
4.16.3 Cellier....309
4.16.4 Cloître hospitalier....311
4.16.5 Bibliothèque....314
4.16.6 Antichambre de la salle du chapitre....318
4.16.7 Réfectoire....322
4.17 Monastère de Jerónimos à Lisbonne....323
4.17.1 Cloître supérieur....323
4.17.2 Chapelles du transept nord et sud....327
4.17.3 Cloître inférieur....335
4.17.4 Réfectoire....340
4.17.5 Nef....343
4.17.6 Transept....348
Conclusions....354
CONCLUSIONS....359
Questions historiques....359
Questions structurelles et constructives....368

Questions architecturales – Le tracé et la construction 370
BIBLIOGRAPHIE 377
Bibliographie sur le Portugal 377
Bibliographie Générale 391
PUBLICATIONS de l'auteur 405

VOLUME II (Annexe)

1 Voûtes à nervures gothiques : tableaux de classification et relevé photographique

2 Cas d'études : relevés et analyses géométriques des voûtes

Abbreviations

ANTT	Arquivo Nacional Torre do Tombo
DGEMN	Direcção Geral des Edificios e Monumentos Nacionais
DGPC	Direção-Geral do Património Cultural
IHRU	Instituto da Habitação e Reabilitação Urbana
IPPAR	Instituto Português do Património Arquitetónico
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ANNEXE

A	Analyse géométrique et relevés

PT	Portugal		Europe	
	Be	Beja	GB	Angleterre
	Br	Braga	FR	France
	Bg	Bragança	DE	Allemagne
	Co	Coimbra	ES	Espagne
	Ev	Évora		
	Fa	Faro		
	Gu	Guarda		
	Le	Leiria		
	Lx	Lisbonne		
	Pg	Portalegre		
	Px	Porto		
	Sa	Santarém		
	Se	Setúbal		
	VC	Viana do Castelo		
	Vi	Viseu		

Liste des figures

Figure 1 Églises-halles de Freixo de Espada-à-Cinta, Arronches et Santa Maria de Belém (Jerónimos). 2
Figure 2. Croquis de Mendes Atanázio dessiné en 1991 lors d'une visite d'étude à l'église de Jerónimos. 6
Figure 3. Signature de João de Castilho datée de 1515. 22
Figure 4. Buste de João de Castilho au monastère de Jerónimos. 22
Figure 5. Colonne nord du transept de l'église Santa Maria de Belém. 22
Figure 6. Croquis de Dürer (Nussbaum, 2007). 66
Figure 7.Villard de Honnecourt (Bechmann 1988) 69
Figure 8. Élévations de Villard de Honnecourt. 69
Figure 9. Élévation de la cathédrale de Reims. 69
Figure 10. Baldassare Peruzzi, projet de Saint-Pierre du Vatican (Ackerman 1954) 70
Figure 11. Antonio Sangallo représentation orthogonale d'une chapelle 71
Figure 12. Villard de Honnecourt. Profils pour la cathédrale de Reims. 72
Figure 13. Méthode de tracé de Roriczer (Bork) 73
Figure 14. Tracé de Schmuttermayer (Shelby 1972) 74
Figure 15. Tracé de Lechler, Unterweisungen, fol. 42r (Huerta Fernández, 2012). 74
Figure 16. Voûte de la nef de Durham. 77
Figure 17. Voûte du chœur de la cathédrale de Lincoln. 77
Figure 18. Tiré du carnet de Villard de Honnecourt. 79
Figure 19. Interprétation du dessin de Villard de Honnecourt, de Viollet Le Duc. 79
Figure 20. Interprétation du dessin de Villard de Honnecourt. 79
Figure 21. Tracé de voûte. 81
Figure 22. Tracé de voûte. 81
Figure 23. Tracé de voûte. 81
Figure 24. Voûte de l'Archbishop Stratford, cathédrale de Canterbury. 82
Figure 25. Voûte à nervures composées du chœur de Gloucester. 82
Figure 26. Voûte à lierne du cloître de Canterbury. (Willis, 1842) 83
Figure 27. Voûte en éventail de la cathédrale de Peterborough. (Willis, 1842) 83

Figure 28. Chœur de la cathédrale de Prague. 84
Figure 29. Voûte du porche sud de la cathédrale de Prague. 86
Figure 30. Voûte de Benedikt Ried à Hradshin, Prague. On note le déconstructivisme des nervures, qui sont dépourvues de naissance. 86
Figure 31. Hall Vladislav, palais de Prague. 16m de portée. 86
Figure 32. Illustrations de voûtes à nervures composées du carnet *The Frankfurt Lodge Book of Master WG,* 1560-1572. 89
Figure 33. Église de Braniewo 90
Figure 34. Monastère de Neuzelle 90
Figure 35. Illustrations de Hoffstadt pour des tracés de voûtes à liernes et des voûtes *à combados.* Planche XIVA partielle (Hoffstadt, 1851). 91
Figure 36. Tracé de Ranisch pour la voûte du chœur de l'église Sainte-Marie à Dantzig. (Hoffstadt 1851) 93
Figure 37. Tracé d'Ungewitter. (Pliego de Andrés, 2011) 94
Figure 38. Tracé de Meckel. (Pliego de Andrés, 2011) 94
Figure 39. Élévation des nervures à partir de l'arc principal selon Müller. 95
Figure 40. Maquette en bois. Nuremberg. 97
Figure 41. Église de Hierschfeld (Bürger, 2007) 98
Figure 42. Église de Laun. (Nussbaum, 2000) 98
Figure 43. Église d'Annaberg. 98
Figure 44. Église de Pirna. 98
Figure 45. Voûte à liernes. 100
Figure 46. Voûte à *combados*. 100
Figure 47. Voûte à nervures composées. 101
Figure 48. A. Tracé de Hernán Ruiz pour une voûte à tiercerons en étoile. 104
Figure 49. Dessin de Rodrigo Gil de Hontañón. 106
Figure 50. Tracé des nervures de la voûte sphérique de Vandelvira. 110
Figure 51. Cathédrale de Séville, chapelle Nostra Senhora de la Antígua. Tracé en plan et en élévation (Palacios, 2009). 111
Figure 52. Cathédrale de Séville, chapelle Nostra Senhora de la Antígua ; section transversale 111
Figure 53. Cathédrale de Ségovie, voûte du cloître, de Juan Guas. 113
Figure 54. Voûte du narthex du couvent San Marcos de Léon, d'Alava. 113
Figure 55. Dessin de Rodrigo Gil de Hontañón. Garcia, Simon, 1681 115
Figure 56. Règle structurelle de Martinez de Aranda. 116
Figure 57. Dessins de Rodrigo Gil de Hontañón. 117
Figure 58. Croisement à angle droit de deux berceaux en plein cintre produit une ellipse. (Viollet Le Duc, 1854-58) 118

Figure 59. La nervure est l'arc générateur de la forme. 118
Figure 60. Disposition des voussoirs en France (gauche) et en Angleterre (droite). 120
Figure 61. Chapitre de la cathédrale de York. *Voûte à liernes*. 120
Figure 62. Voûte de l'église Mouliherne. *Voûte à nervures composées.* 123
Figure 63. Voûtes d'ogives. 125
Figure 64. Voûtes d'ogives, église Santa Maria do Olival, Tomar 125
Figure 65. Voûtes d'ogives, couvent du Crist à Tomar 125
Figure 66. Voûtes à tiercerons. 127
Figure 67. Église Nossa Senhora do Pópulo (Ti_4) 128
Figure 68. Église-matrice de Mértola, chœur (Ti_E4) 128
Figure 69. Monastère de Batalha, 128
Figure 70. Église Nossa Senhora do Pópulo, chœur (Ti_Cu) 128
Figure 71. Voûtes à liernes 129
Figure 72. Monastère Santa Cruz, Coimbra, chœur 130
Figure 73. Église de Misericórdia d'Arronches, chapelle (Li_E4) 130
Figure 74. Église d'Atalaia (Li_E4//) 130
Figure 75. Couvent São Domingos, Évora (Li_F4) 130
Figure 76. Monastère de Jerónimos, Lisbonne, cloître inférieur (Li_F4) 130
Figure 77. Monastère d'Alcobaça, passage vers la sacristie (Li_F6) 130
Figure 78. Voûtes à *combados.* 132
Figure 79. Couvent São Francisco, chapelle 133
Figure 80. Église de Marvila, chœur 133
Figure 81. Voûtes à nervures composées 135
Figure 82. Cathédrale de Leiria. 137
Figure 86. Couvent du Christ, Tomar, chapitre. Cp_(O) 4C 138
Figure 87. Monastère de Jerónimos, Lisbonne, cloître 138
Figure 88. Couvent du Christ, Tomar, cloître principal. Cp_(O-Ti) 2C 138
Figure 89. Monastère de Jerónimos, Lisbonne, portail sud 138
Figure 90. Couvent du Christ, Tomar, réfectoire. Cp_//murs. 138
Figure 91. Monastère de Jerónimos, Lisbonne, portail sud 138
Figure 92. Églises-halles castilliennes 140

Figure 93. Église du couvent de Jesus de Setúbal 141
Figure 94. Église d'Arronches 141
Figure 95. Cathédrale de Viseu 141
Figure 96. Église de Torre de Moncorvo 141
Figure 97. Église de Freixo de Espada-a-Cinta 141
Figure 98. Église du monastère de Jerónimos 141
Figure 99. Églises de Luz à Tavira (A, B) et de Santo Antão à Évora (D, E), Alcáçovas (C) et Santa Maria da Feira à Beja (F). 142
Figure 100. Églises-halles manuélines. 143
Figure 101. Églises-halles Renaissance 144
Figure 102. Carte de localisation des voûtes d'ogives analysées au Portugal 154
Figure 103. Carte de localisation des voûtes à tiercerons analysées au Portugal 154
Figure 104. Carte de localisation des voûtes à liernes analysées au Portugal 155
Figure 105. Carte de localisation des voûtes à combados analysées au Portugal 155
Figure 106. Carte de localisation des voûtes à nervures composées analysées au Portugal 156
Figure 107. Carte de localisation des églises-halles analysées au Portugal; 156
Figure 108. Plans des travaux de restauration de 1927-31. 166
Figure 109. Photos de détails des nervures. 167
Figure 110. Photo de la toiture du transept 168
Figure 111. Sondages à l'extrados des voûtes de la nef et du transept. 170
Figure 112. Sondages directs visant à déterminer l'épaisseur du matériau du revêtement ainsi que des tests endoscopiques. 171
Figure 113. Données obtenues des sondages par Géo Radar. 171
Figure 117. Plan et élévation de la nef et du transept de l'église Santa Maria de Belém (Jerónimos) et analyse de la géométrie. 175
Figure 118. Analyse géométrique de la voûte de la nef. 176
Figure 119. Modèle en 3D des voûtes de la nef et du transept. 177
Figure 120. Plan des nervures principales reliant les supports. 179
Figure 121. Plan des *combados*. 179
Figure 122. Tiercerons en étoiles. 179
Figure 123. Photos des tas de charges de la nef sur la colonne et la console. 183
Figure 124. Dessins des tas de charges de la nef. 183
Figure 125. Tas de charge de la voûte du transept. 184
Figure 126. Façade este du transept. 184

Figure 127. Plan photogrammétrique montrant la disposition des voussoirs. (Genin, 1999) 185
Figure 128. Clefs des voûtes de la nef (en haut) et du transept (en bas). 187
Figure 129. Dessins des colonnes du transept (gauche) et de la nef (droite). 189
Figure 130. Sondages aux colonnes du transept et de la nef (Monteiro-Genin, 1995) 189
Figure 131. Registre des anomalies et des restaurations des deux voûtes. 190
Figure 132. Verticalité des murs et des colonnes 192
Figure 133. Déformations du type *portique* 192
Figure 134. A – tensions en traction ; B – tensions en compression. 192
Figure 135. Voûtes du cloître hospitalier à Tomar. 193
Figure 136. Sections du cloître Hospitalier. (Genin, 2006) 194
Figure 137. Élévation des nervures : formeret et tierceron (nervure composée). 194
Figure 138. Détails constructifs de la voûte 195
Figure 139. Déformations horizontales 196
Figure 140. Affaissement de la nervure suite à l'écartement des appuis. 198
Figure 141. Sections de la voûte du cloître Hospitalier. 198
Figure 142. Modélisation des voûtes. (a) Module-type ; 199
Figure 143. Résultats de l'analyse élastique du module nord. 200
Figure 144. Rapport entre le déplacement vertical maximum de la voûte et le facteur de charge λ (Lourenço, 2004) 201
Figure 145. Voûte de la sacristie du monastère de Jerónimos. 209
Figure 146. Hypothèse du tracé en plan et en élévation de la voûte de la sacristie du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 211
Figure 147. Dessin tridimensionnel de la voûte de la sacristie du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 211
Figure 148. Méthode de taille des nervures : A, B, C, E, F (www.bovedasgoticasdecruceria.com) 212
Figure 149. Méthode de taille des clefs 213
Figure 150. Méthodes de la taille des clefs verticales (A) et des clefs inclinées (B) 214
Figure 151. A, B, Clef inclinée de la sacristie de Jerónimos 214
Figure 152. Méthodes de la taille des tas de charges 215
Figure 153. Méthode de construction de la voûte 217
Figure 154. Deux hypothèses de tracé en élévation pour la construction de la voûte. 219
Figure 155. Plan des nervures et des voussoirs 220
Figure 156. Voûte du chœur de la cathédrale de Braga. 221
Figure 157. Hypothèse du tracé en plan et en élévation de la voûte du chœur de la cathédrale de Braga. 223

Figure 158. Dessin tridimensionnel du chœur de la cathédrale de Braga. 223
Figure 159. Plan des voussoirs et profils des nervures de la voûte du chœur la cathédrale de Braga. 224
Figure 160. Dessin tridimensionnel du porche, cathédrale de Braga. 225
Figure 161. Voûte du porche, cathédrale de Braga. 225
Figure 162. Hypothèse de tracé en plan et en élévation. 226
Figure 163. Voûte du chœur du couvent de Jésus de Setúbal. 227
Figure 164. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du chœur du couvent de Jésus de Setúbal. 229
Figure 165. Dessin tridimensionnel de la voûte. 229
Figure 166. Plan des voussoirs et profils des nervures. 230
Figure 167. Voûte de la nef de l'église de Jésus de Setúbal. 231
Figure 168. Dessin tridimensionnel de la voûte de la nef de l'église de Jésus de Setúbal. 232
Figure 169. Hypothèse de tracé en plan et en élévation. 232
Figure 170. Voûte du chœur de l'église matrice de Vila do Conde. 233
Figure 171. Hypothèse de tracé en plan et en élévation pour la voûte du chœur. 235
Figure 172. Dessin tridimensionnel de la voûte du chœur de l'église matrice de Vila do Conde. 235
Figure 173. Plan des voussoirs et profils des nervures. 236
Figure 174. Voûte de la chapelle gauche du chœur de l'église matrice de Vila do Conde. 237
Figure 175. Voûte de la chapelle droite du chœur de l'église matrice de Vila do Conde. 237
Figure 176. Dessin tridimensionnel de la voûte de la chapelle droite de la nef de l'église matrice de Vila do Conde. 238
Figure 177. Voûte de la chapelle droite de la nef de l'église matrice de Vila do Conde. 238
Figure 178. Voûte du chœur du monastère de Vilar de Frades. 239
Figure 179. Hypothèse de tracé en plan et en élévation. 241
Figure 180. Dessin tridimensionnel de la voûte. 241
Figure 181. Plan des voussoirs et profil des nervures. 241
Figure 182. Échafaudage partant du sol pour la reconstruction de la voûte du chœur du monastère de Vilar de Frades. 243
Figure 183. Vue de l'extrados de la voûte du chœur montrant un arc transversal et le recouvrement de la voûte. (IHRU) 243
Figure 184. Cintres et liernes faîtières posés à plat sur des planchers. (IHRU) 243
Figure 185. Voûte de la croisée du monastère de Vilar de Frades. 244
Figure 186. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la croisée du monastère de Vilar de Frades. 245
Figure 187. Dessin tridimensionnel de la voûte de la croisée du monastère de Vilar de Frades. 245
Figure 188. Plan des voussoirs et profil des nervures de la voûte de la croisée du monastère de Vilar de Frades. 246

Figure 189. Voûte de la chapelle gauche du transept du monastère de Vilar de Frades. 247
Figure 190. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la chapelle gauche du transept du monastère de Vilar de Frades. 248
Figure 191. Dessin tridimensionnel de la voûte de la chapelle gauche du monastère de Vilar de Frades. 248
Figure 192. Plan des voussoirs de la voûte de la chapelle gauche du monastère de Vilar de Frades. 249
Figure 193. Voûte de la nef du monastère de Vilar de Frades. 250
Figure 194. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la nef du monastère de Vilar de Frades. 251
Figure 195. Plan des voussoirs de la voûte de la nef du monastère de Vilar de Frades. 252
Figure 196. Voûte de la chapelle de Carneiros du couvent São Francisco, à Porto. 253
Figure 197. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la chapelle de Carneiros du couvent de São Francisco, à Porto. 254
Figure 198. Voûte de la nef de la cathédrale de Viseu. 255
Figure 199. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la nef de la cathédrale de Viseu. 257
Figure 200. Dessin tridimensionnel de la voûte de la nef de la cathédrale de Viseu. 257
Figure 201. Plan des voussoirs de la nef de la cathédrale de Viseu. 258
Figure 202. Croisement des nervures à la retombée sur la console entre la nef et le transept. 258
Figure 203. Voûte du narthex de la cathédrale de Viseu. 259
Figure 204. Hypothèse de tracé en plan et en élévation du narthex de la cathédrale de Viseu. 261
Figure 205. Dessin tridimensionnel de la voûte du narthex de la cathédrale de Viseu. 261
Figure 206. Plan des nervures et des voussoirs du narthex de la cathédrale de Viseu 262
Figure 207. Voûte de la nef de l'église matrice de Freixo de Espada-à-Cinta 263
Figure 208. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la nef de l'église matrice de Freixo de Espada-à-Cinta. 265
Figure 209. Dessin tridimensionnel de la voûte de la nef de l'église-matrice de Freixo de Espada-à-Cinta 265
Figure 210. Plan des nervures et des voussoirs de la voûte de la nef de l'église de Freixo de Espada-à-Cinta. 266
Figure 211. Extrados de la voûte de l'église de Freixo de Espada-à-Cinta. 266
Figure 212. Crampons métallique liant les claveaux des liernes faîtières de la voûte de la nef. 267
Figure 213. Extrados de la voûte du chœur. 267
Figure 214. Voûte du chœur de l'église de Freixo de Espada-à-Cinta. 267
Figure 215. Plan des nervures et des voussoirs. 269
Figure 216. Dessin tridimensionnel de la voûte du chœur de l'église matrice de Freixo de Espada-à-Cinta. 269
Figure 217. Voûte de la chapelle gauche du chœur de l'église-matrice de Freixo de Espada-à-Cinta. 270
Figure 218. Voûte à *combados* du chœur de l'église de Misericordia de Freixo de Espada-à-Cinta**.** 271
Figure 219. Voûte du chœur de l'église de Misericordia de Freixo de Espada-à-Cinta. 273

Figure 220. Modélisation de la voûte montrant la forme et mettant en évidence les deux lignes faîtières horizontales. 273
Figure 221. Voûte de la nef de l'église matrice d'Arronches. 275
Figure 222. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la nef de l'église matrice d'Arronches. 277
Figure 224. Chapelle droite de la nef de l'église matrice d'Arronches. 278
Figure 225. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle droite de la nef de l'église matrice d'Arronches. 279
Figure 226. Dessin tridimensionnel de la voûte de la chapelle droite de la nef de l'église matrice d'Arronches. 279
Figure 227. Voûte de la chapelle droite du chœur de l'église matrice d'Arronches. 280
Figure 228. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle droite du chœur de l'église matrice d'Arronches. 280
Figure 229. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du narthex de l'église matrice d'Arronches. 281
Figure 230. Voûte de la nef de l'église de Misericordia à Arronches. 282
Figure 231. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la nef de l'église de Misericordia à Arronches. 283
Figure 232. Voûte du chœur de l'église de Misericordia à Arronches. 284
Figure 233. Voûte de la nef de l'église de Torre de Moncorvo. 285
Figure 234. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la nef de l'église de Torre de Moncorvo. 287
Figure 235. Dessin tridimensionnel de la voûte de la nef de l'église de Torre de Moncorvo. 287
Figure 236. Voûte du chœur de l'église de Marvila. 288
Figure 237. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du chœur de l'église de Marvila. 289
Figure 238. Dessin tridimensionnel de la voûte du chœur de l'église de Marvila. 290
Figure 239. Voûte de la chapelle gauche de l'église de Marvila. 291
Figure 240. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle gauche de l'église de Marvila. 292
Figure 241. Dessin tridimensionnel de la voûte de la chapelle gauche de l'église de Marvila. 292
Figure 242. Voûte du passage vers la sacristie du monastère d'Alcobaça. 293
Figure 243. Hypothèse de tracé en plan et en élévation. 295
Figure 244. Dessin tridimensionnel de la voûte du passage vers la sacristie du monastère d'Alcobaça. 295
Figure 245. Plan des voussoirs et profils de nervures de la voûte du passage vers la sacristie du monastère d'Alcobaça. 297
Figure 246. Voûte tournante du monastère de Batalha 298
Figure 247. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte tournante du monastère de Batalha. 300
Figure 248. Dessin tridimensionnel de la voûte tournante du monastère de Batalha. 300
Figure 249. Plan des voussoirs de la voûte tournante du monastère de Batalha. 302
Figure 250. Voûte de l'église du couvent du Christ, à Tomar 303
Figure 251. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de l'église du couvent du Christ, à Tomar. 305

Figure 252. Dessin tridimensionnel de la voûte de l'église du couvent du Christ, à Tomar. 305
Figure 253. Plan des voussoirs de la voûte de l'église du couvent du Christ, à Tomar. 306
Figure 254. Croisement des nervures au tas de charge. 306
Figure 255. Crampons métalliques. 306
Figure 256. Voûte du cloître Santa Bárbara - Couvent du Christ, Tomar. 307
Figure 257. Hypothèse de tracé en plan et en élévation. 308
Figure 258. Dessin tridimensionnel de la voûte du cloître Santa Bárbara. 308
Figure 259. Voûte du cellier du couvent du Christ, à Tomar. 309
Figure 260. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du cellier du couvent du Christ, à Tomar. 310
Figure 261. Voûte du cloître hospitalier du couvent du Christ, à Tomar. 311
Figure 262. Hypothèse de tracé en plan et élévation. 313
Figure 263. Dessin tridimensionnel de la voûte du cloître hospitalier. 313
Figure 264. Voûte de la bibliothèque du couvent du Christ, à Tomar. 314
Figure 265. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la bibliothèque du couvent du Christ, à Tomar. 317
Figure 266. Dessin tridimensionnel de la voûte de la bibliothèque du couvent du Christ, à Tomar. 317
Figure 267. Voûte de l'antichambre de la salle du chapitre du couvent du Christ, à Tomar. 318
Figure 268. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de l'antichambre de la salle du chapitre du couvent du Christ, à Tomar. 320
Figure 269. Dessin tridimensionnel de la voûte. 320
Figure 270. Hypothèse de tracé en élévation de la voûte du réfectoire du couvent du Christ, à Tomar. 322
Figure 271. Voûte du réfectoire du couvent du Christ, à Tomar. 322
Figure 272. Voûte du premier étage du cloître du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 323
Figure 273. Hypothèse de tracé en plan et en élévation. 325
Figure 274. Dessin tridimensionnel. 325
Figure 275. Plan des voussoirs et profils des nervures. 326
Figure 277. Voûte de la chapelle nord du transept du monastère de Jerónimos. 327
Figure 278. Voûte de la chapelle sud du transept du monastère de Jerónimos. 327
Figure 279. Dessin tridimensionnel des voûtes des chapelles nord (A) et sud (B) du transept. 329
Figure 280. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle nord du transept du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 330
Figure 281. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle sud du transept du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 330
Figure 282. Plan des voussoirs et profils des nervures. 332
Figure 283. Photos prises de l'intrados pendant les travaux de restauration de la chapelle nord. 333

Figure 285. Hypothèse de construction de la voûte sud. 334
Figure 286. Voûte du cloître inférieur du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 335
Figure 287. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte nord. 337
Figure 288. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte sud. 337
Figure 289. Tas de charge entre la voûte sud et nord du cloître inférieur. 339
Figure 290. Plan des voussoirs et profils des nervures. 339
Figure 291. Dessin tridimensionnel des voûtes sud et nord du cloître inférieur. 339
Figure 292. Voûte du réfectoire du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 340
Figure 293. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du réfectoire du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 342
Figure 294. Dessin tridimensionnel de la voûte du réfectoire du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 342
Figure 295. Voûte de la nef du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 343
Figure 296. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la nef du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 345
Figure 297. Dessin tridimensionnel de la voûte. 345
Figure 298. Plan des voussoirs et profils des nervures. 346
Figure 299. Hypothèse de construction. 347
Figure 300. Voûte du transept du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 348
Figure 301. Hypothèse de tracé en plan du transept du monastère de Jerónimos à Lisbonne. 349
Figure 302. Hypothèse de tracé en plan et en élévation. 351
Figure 303. Dessin tridimensionnel de la voûte. 351
Figure 304. Plan des voussoirs et profils des nervures. 352
Figure 305. Hypothèse de construction. 353

Les photos et les dessins non identifiés sont de l'auteur.

Liste des tableaux

Tableau 1 - Tableau de classification des voûtes - Portugal 145

ANNEXE

Tableau 1 - Tableau de classification des voûtes – Portugal

Tableau 2 - Tableau de classification des voûtes – Angleterre

Tableau 3 - Tableau de classification des voûtes – Allemagne

Tableau 4 - Tableau de classification des voûtes - Espagne

Liste des annexes

Volume II

1- Voûtes à nervures gothiques : tableaux de classification et relevé photographique

Portugal (PT)

Angleterre (GB)

France (FR)

Allemagne (DE) et Europe centrale

Espagne (ES)

2- Cas d'études : relevés et analyses géométriques des voûtes
Annexe (A)

INTRODUCTION

Questions historiques

En histoire de l'art, il est commun de ranger le style manuélin dans la catégorie des « styles décoratifs » du gothique tardif portugais en usage sous le règne du roi Dom Manuel I (1495-1521) et qui se sont prolongés jusque sous le règne du roi Dom João III (1521-1557).

L'adjectif *manuélin* a été utilisé pour la première fois en 1841 par Francisco Varnhagen à propos du monastère de Jerónimos, dont il avait remarqué la décoration des fenêtres et des portes[1]. Depuis lors, le manuélin a toujours été associé à un style décoratif.

Mário Tavares Chicó fut le premier à remarquer l'originalité spatiale du manuélin et l'importance de l'église du monastère de Jerónimos. Selon lui, il s'agissait de la principale église-halle[2] de ce style en Europe. Il remarqua que, comme d'autres monuments du type d'église-halle (églises de Freixo de Espada-à-Cinta et d'Arronches), la fusion des trois nefs est plus aboutie que dans d'autres églises européennes d'Italie, d'Angleterre, d'Autriche, d'Allemagne ou d'autres pays nord-européens. Il note que, même au 15ème siècle début du 16ème, lorsque les ogives furent remplacées par des réseaux de nervures, les trois nefs sont toujours recouvertes par des voûtes indépendantes. [3]

Ces trois églises manuélines semblent être recouvertes par une seule voûte qui traverse les trois nefs. Transversalement, la section de leurs voûtes est courbe et définie par un arc de cercle reliant les deux murs longitudinaux. À Jerónimos (Santa Maria de Belém), cette fusion est encore plus claire, tant transversalement que longitudinalement, parce que toute la surface du sommet de la voûte est courbe et crée une forme en berceau (Figure 1).

Chicó compare les nervures croisées de la nef de Jerónimos à celles qu'utilisa Juan Guas pour la coupole de San Juan de los Reyes de Tolède, et la voûte du transept aux voûtes anglaises, à « nervures et carrés disposés obliquement ». Chicó signale que Varnhagen a abordé l'originalité du style manuélin sans toutefois réussir à le comparer avec les monuments d'Europe et d'Afrique. Selon l'auteur « …ce qui rend difficile et plus complexe l'étude des couvertures de l'époque manuéline est, plus que la diversité de leurs types, l'origine des sources qui les ont inspirées ». [4]

[1] VARNHAGEN, F. A., "Notícia histórica e descriptiva do Mosteiro de Belém", in *Panorama*, II série, Lisbonne, 1842.

[2] CHICÓ, Mário Tavares, *A Arquitectura Gótica em Portugal*, Livros Horizonte, Lisbonne, 2005, (1ère ed. 1954), pp. 15. L'église-halle est un type architectural dans lequel les trois nefs sont à la même hauteur et qui est normalement associé au gothique tardif allemand. Ainsi, le terme *hallenkirche* est-il souvent utilisé dans la bibliographie portugaise. Chicó mentionne l'église d'Alcobaça (1252) comme étant la plus ancienne église au Portugal dont les voûtes des 3 nefs présentent une hauteur égale, mais il note que l'épaisseur des colonnes empêche d'avoir une bonne visibilité en diagonale et qu'elle ne correspond donc pas au type des églises-halles françaises et allemandes du 15ème et du 16ème siècle. Au Portugal, ce style s'est développé en plein règne du roi Dom Manuel I, à la même époque que la construction de l'église de Jerónimos.

[3] CHICÓ, Mário Tavares, *A Arquitectura Gótica em Portugal,* Livros Horizonte, Lisboa, 2005, (1ª ed. 1954), pp. 15-21, pp. 159-163.

[4] CHICÓ Mário Tavares, *op. cit.,* 2005, pp. 153-161.

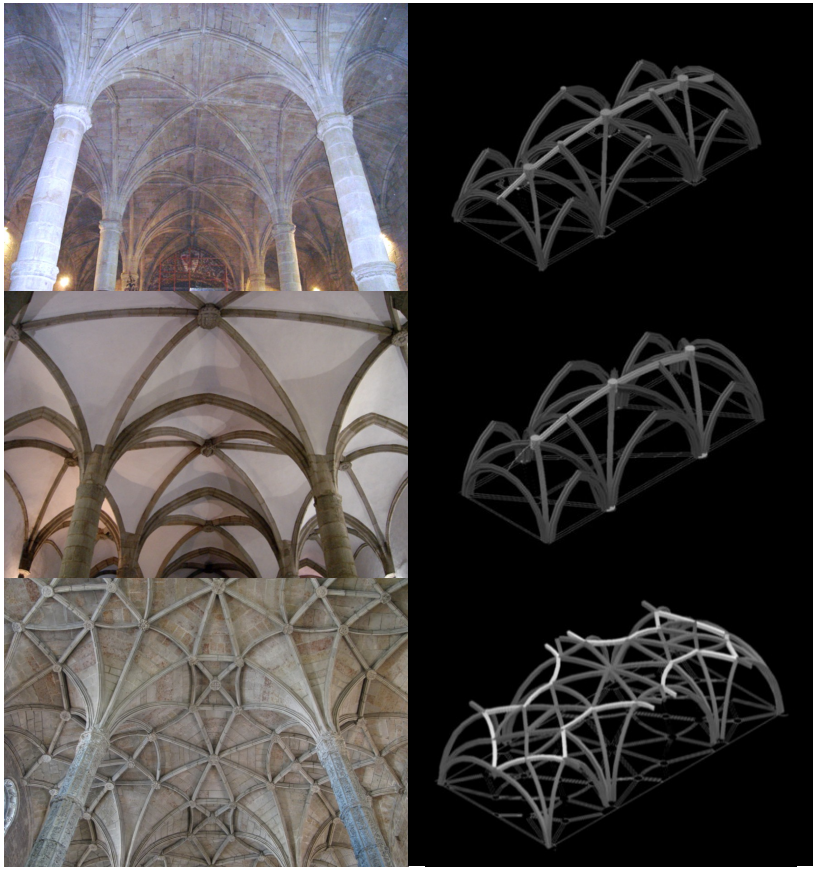


Figure 1 Églises-halles de Freixo de Espada-à-Cinta, Arronches et Santa Maria de Belém (Jerónimos).
Transversalement, la section de leurs voûtes est courbe et définie par un arc de cercle reliant les deux murs longitudinaux. À Jeronimos, il n'existe pas de doubleaux séparant les travées et le sommet prend la forme d'un berceau.

Manuel Mendes Atanázio va plus loin dans ses analyses architecturales et structurelles. Il remarque la constance de la dispersion de la lumière obtenue grâce aux surfaces ininterrompues de la voûte et l'unité spatiale, ce qui élève l'architecture manuéline au niveau de ce qui se faisait de mieux à cette époque.

Atanázio affirme que « le Manuélin est structurellement une réaction au Gothique de par sa conception, qui lui est propre et où l'efficacité première de la toile des polynervures a été de maintenir l'intrados à un même niveau et de parvenir à distribuer les poussées uniformément sur les murs qui, pour pouvoir supporter telle charge, furent conçus résistants et épais ».

Concernant l'analogie architectonique entre ces trois églises-halles, cet auteur suggère qu'il existe une unique « conscience architectonique » qui recherchait de nouvelles solutions pour réaliser l'unité spatiale, en parlant de João de Castilho (vers 1470-1552).[5]

João de Castilho est connu pour ses voûtes et pour avoir introduit les nervures courbes au Portugal, type de voûte qu'il a apportée d'Espagne, son pays d'origine, et qu'on retrouve par exemple dans le chœur de la cathédrale de Braga. Cette voûte est la première de João de Castilho au Portugal qui soit documentée.

Rafael Moreira n'hésite pas à parler d'un style « castilhien » et souligne la spécificité d'une œuvre qui a su si bien exprimer la société de son époque. Cette architecture est située à la charnière

[5] ATANÁZIO, M. C. Mendes, *A Arte do Manuelino, Mecenas, Influências, Espaços*, Presença, Lisboa, 1984, pp.112-122.

entre le gothique et la Renaissance, moment historique de changements tant conceptuels que techniques.[6]

Moreira compare João de Castilho à Benedikt Ried en Bohème et à Rodrigo Gil de Hontañón et à Juan de Herrera en Espagne : il est « …le seul architecte de l'histoire qui a collaboré, ou construit à peine, cinq ouvrages qui sont inscrits au Patrimoine de l'Humanité par l'UNESCO : certaines parties des monastères d'Alcobaça et de Batalha, l'essentiel du monastère de Jerónimos, la ville fortifiée de Mazagão (Maroc) et le couvent du Christ de Tomar ».[7]

Certains de ses ouvrages sont documentés, mais, les sources n'attribuent généralement pas les voûtes. Quelques attributions sont accordées à partir de comparaisons architecturelles se basant sur des analyses visuelles, mais aucune étude n'a abordé son œuvre architecturale, ni plus précisément ses voûtes.

La seule étude architecturale des voûtes disponible était notre thèse de maîtrise, qui était consacrée à la voûte de la nef de l'église du monastère de Jerónimos[8]. Nous l'avions attribuée à Castilho en nous fondant sur une analyse architecturale, sur les plans et sur l'étude des détails constructifs et en la comparant avec d'autres voûtes du monastère. Le rapport qui unit la nef et le transept est assez évident, tant au niveau du plan que de l'élévation.

En outre, deux documents historiques font référence à des paiements à « Maître » João de Castilho pour ses travaux au monastère. Le dossier des travaux[9] mentionne la sacristie, le chapitre, la porte sud et le cloître, et contient une lettre du roi concernant la voûte du transept.

Malgré les documents disponibles, le projet des voûtes de Jerónimos est parfois attribué à Boitaca, et l'exécution à Castilho, comme nous le verrons au premier chapitre. Le nom de Castilho est souvent associé à celui de Boitaca, qui était l'architecte du roi avant lui.

La présente étude s'est attachée à trouver des caractéristiques et à identifier l'architecture des voûtes de João de Castilho en espérant ainsi dissiper des questions relatives à l'attribution de certains ouvrages et contribuer au développement de nos connaissances sur les voûtes à nervures de cette époque au Portugal. Par ailleurs, nous voulions également étudier son architecture sous l'angle des influences et de l'originalité de cet architecte en contexte européen, notamment en ce qui concerne les voûtes de l'église du monastère de Jerónimos.

[6] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal. A Encomenda Régia entre o Moderno e o Romano.* Thèse de doctorat en Histoire de l'Art. Lisbonne. Universidade Nova de Lisboa, 1991, p. 498.

[7] GENIN, Soraya, MOREIRA, Rafael, De JONGE, Krista, "As igrejas-salão portuguesas. A inovação de João de Castillo", in *La arquitectura Tardogótica castellana entre Europa y América*. Congresso La Arquitectura Tardogótica Castellana, entre Europa y América, Santander, 2010, 10-12 Fevereiro, ALONSO RUIZ, Begoña (Ed.), Madrid, Editorial Silex, 2011, p. 546.

[8] MONTEIRO, Soraya, *Étude descriptive de la voûte de l'église du monastère de Santa Maria de Belém à Lisbonne*. Thèse de maîtrise (non publiée) Katholieke Universiteit Leuven, 1995.

[9] CORREIA, Vergílio, *As Obras de Santa Maria de Belém de 1514 a 1519*, Tip. do Anuário Comercial, Lisboa, 1922.

Questions structurelles et constructives.

Du point de vue de leur structure, les voûtes de l'église de Jerónimos sont sans équivalent. Par comparaison avec d'autres édifices européens, les deux voûtes qui couvrent sa nef et son transept sont d'une ampleur remarquable et elles combinent des formes de la Renaissance avec un système constructif gothique de voûtes à nervures. Plus subjectivement, si la voûte du transept impressionne par sa force et sa hardiesse, dans la nef, on est frappé par la lumière, la légèreté et l'élégante simplicité des formes.

Les trois nefs sont recouvertes d'une voûte en berceau sur colonnes de 22,40m sur 51,41m. Le transept est recouvert d'une voûte de 28,80m sur 19,00m sans appui intermédiaire.

En Espagne, les plus grande portée de voûtes sont celles de la cathédrales de Gerona (23 m), Palma (20 m) et Plasencia (17,30 m)[10].

À Gerona, la construction fut arrêtée en 1416, afin de construire une voûte unique sans appui intermédiaire. La structure actuelle de cette voûte en croisée d'ogives a fait l'objet de vives discussions entre les savants en 1416. La construction a eu lieu au cours du 15ème siècle et ce ne fut qu'en 1598 que la dernière travée fut terminée.[11]

La voûte de la nef de Jerónimos reprend la forme en berceau, qui avait pourtant été délaissée à cause des importantes poussées qu'elle exerce sur les murs. Pourtant, la stabilité de telles voûtes est, historiquement, largement établie. La preuve en est que l'église de Jerónimos a résisté au grand séisme qui dévasta Lisbonne en 1755.

Nos relevés ont montré un déversement des piliers vers l'extérieur tandis que les murs restent d'aplomb, ce qui démontre la stabilité de la structure, comportement typique d'une église à trois nefs.

Santiago Huerta Fernández indique que Rodrigo Gil de Hontañón a effectué des recherches pour trouver des règles de dimensionnement des contreforts des voûtes en berceau pendant la Renaissance, mais qu'il n'a jamais osé en construire : « De toute évidence, Gil de Hontañón connaissait la spécificité des règles gothiques et il n'essaie même pas de les appliquer au nouveau type de structure ». [12]

Par comparaison avec d'autres exemples européens, la voûte de la nef ressemble à une structure anglaise : un sommet surbaissé fournit du poids aux reins et, grâce au remplissage et à la forme continue des voûtains, les poussées descendent à un niveau suffisamment bas

[10] PALACIOS GONZALO, José Carlos, "Geometric Tools in Juan De Alava's Stonecutting, Workshop", in *Nexus Network Journal 11*, Kim Williams Books, Turin , 2009, pp. 13-14.

[11] HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "Mecánica de las bóvedas de la catedral de Gerona", in *Seminari sobre l'estudi i la restauració estructural de les catedrals gòtiques de la corona Catalano-Aragonesa*. Servei de Publicacions de la Universitat de Girona, Gerona, 2004, pp. 179-204.

[12] HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "The medieval 'scientia' of structures: the rules of Rodrigo Gil de Hontañón", in *Towards a History of Construction. Between Mechanics and Architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel, 2002, pp. 580-581.

que pour qu'il soit inutile de recourir à des contreforts.[13] À Jerónimos, on constate que certains contreforts ne sont pas alignés avec les piliers.

Les détails constructifs de la voûte de la nef sont caractéristiques des voûtes gothiques. Les nervures servent à poser les voûtains ; entre chaque paire de nervures, les voussoirs sont concaves, à double courbure et le remplissage des reins est d'au moins 1/3 de la hauteur de la voûte au-dessus des consoles.

Selon Huerta Fernández, appliquer des règles gothiques à une structure Renaissance serait désastreux[14]. Seul un grand architecte aurait osé dépasser ces limitations et proposer et construire une nouvelle forme.

Le comportement structurel n'est pas seulement très dépendant de la forme, mais aussi des détails constructifs. Les documents historiques indiquent que, à la nef de Jeronimos, le queutage des nervures est incorporé dans la maçonnerie. Ce qui signifie que ces nervures intégrées ainsi dans la construction font par conséquent partie de la structure.[15.]

[13] HEYMAN J.4, "Spires and Fan Vaults", in *International Journal of Solids Structures*, vol. 3, 1967, p. 250.
[14] HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "The medieval 'scientia' of structures: the rules of Rodrigo Gil de Hontañón", in *Towards a History of Construction. Between Mechanics and Architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel, 2002, pp. 580.
[15] FITCHEN, John, *The Construction of Gothic Cathedrals: A Study of Medieval Vault Erection*, The Clarendon Press, Oxford, 1961, op. cit., 1961, p. 69; «quand les nervures rentrent dans la maçonnerie elles sont structurelles, en augmentant l'épaisseur et force de la voûte».

Mendes Atanázio, dans son livre *A Arte do Manuelino*, consacre un chapitre aux « voûtes polynervurées et à *combados* » (nervures courbes qui relient les clefs). Il interprète la multiplication des nervures comme un moyen de réduire les surfaces des voûtains, de limiter la concavité de ceux-ci afin que la surface de la voûte soit plus continue et sphérique dans son ensemble. La présence de *combados* suppose une surface surbaissée et cupulaire. Les nervures courbes, au lieu de redistribuer les charges directement vers les supports, ont pour fonction de freiner et de dévier les poussées des nervures primaires, grâce à leur courbure orientée dans le sens contraire des poussées.[16]

Atanázio, historien de l'art et architecte, nous avait tracé sur place une esquisse de la nef pour nous en expliquer la structure. Sur ce croquis, il a annoté : « Les voûtes manuélines découlent de deux structures opposées : la voûte à nervures + la voûte cupulaire (voûte sphérique). Or celle-ci est une coupole » (Figure 2).

Le dessin représente d'une part les nervures distribuant les poussées vers les colonnes qui supportent la voûte en berceau et de l'autre la distribution uniforme des poussées d'une coupole, forme que prennent les carrés et les octogones de la nef centrale.

Selon James Acland, des études sur ordinateur ont montré que les nervures curvilignes sont coïncidentes aux lignes de concentration

[16] ATANÁZIO, M. C. Mendes, *A Arte do Manuelino, Mecenas, Influências, Espaços*, Presença, Lisboa, 1984, pp.117-122.

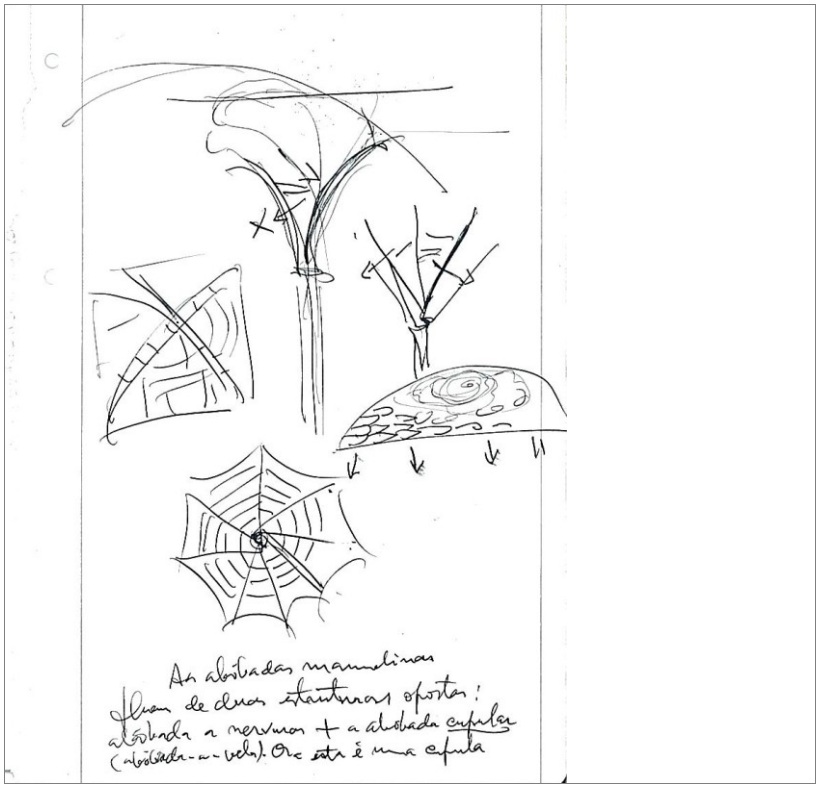


Figure 2. Croquis de Mendes Atanázio dessiné en 1991 lors d'une visite d'étude à l'église de Jerónimos.
Traduction du texte : « Les voûtes manuélines découlent de deux structures opposées : la voûte à nervures + la voûte cupulaire (voûte sphérique). Or celle-ci est une coupole ». Le dessin représente d'une part les nervures distribuant les poussées vers les colonnes qui supportent la voûte en berceau et de l'autre la distribution uniforme des poussées d'une coupole, forme que prennent les carrés et les octogones de la nef central.

des poussées.[17]

La valeur structurelle de la nervure est un point habituel de discussion qui mérite toute notre attention. Nous n'envisageons cependant pas d'en faire notre sujet principal, car cela dépasserait nos capacités. Mais étant donné l'importance de la question, nous espérons contribuer à éclaircir certains aspects qui influencent la structure : la forme de la voûte et les détails constructifs, des nervures notamment.

Questions architecturales - Le tracé et la construction

La première question que l'on se pose pour Jerónimos est celle de la création de la forme. La plupart des auteurs considèrent que la conception préalable de la forme est une caractéristique propre à la Renaissance, qui s'appuyait sur les connaissances géométriques de l'époque.

En effet, certaines voûtes nervurées ne dénotent pas un effort particulier en matière de recherche de forme. Mais à Jeronimos, les voûtes produisent une continuité spatiale très aboutie et elles prennent des formes de coupole, de berceau ou autre, moins

[17] ACLAND, James H., *Medieval Structures: The Gothic Vault*, University of Toronto Press, Toronto, 1972, p. 207. L'auteur considère qu'il s'agit là d'un moyen de visualiser le jeu des forces dans la voûte, même si par la suite, les nervures courbes tendront à perdre cette fonction pour devenir simplement décoratives.

immédiatement identifiables. Quelle est la forme de la voûte du transept ? Ce n'est ni un berceau ni une coupole. Comment a-t-elle été conçue, et surtout comment a été tracée l'élévation des arcs ? Quelle a été la méthode suivie pour tracer et construire cette voûte ?

D'après Krista De Jonge, le gothique moderne est contemporain de la Renaissance et s'enrichit de ses formes. Il est important de bien comprendre « la pensée géométrique pour comprendre la signification des complexités formelles du gothique moderne ».[18]

Rabasa Diaz et Palacios Gonzalo partagent l'idée que la forme n'est conçue préalablement qu'à la Renaissance et ces auteurs reconnaissent aux Gothiques la capacité de créer leurs formes en s'appuyant sur leur système constructif.

Pour Enrique Rabasa Diaz, les constructeurs gothiques étaient capables de créer un volume précis et géométrique en déterminant la hauteur des clefs. Il suffit d'élever ces points à la hauteur souhaitée à partir du plan pour adapter n'importe quelle forme spatiale sans devoir recourir à des moyens graphiques très poussés.[19]

La forme n'était pas conçue au préalable, elle résulte du système constructif d'un réseau de nervures engendrées par des points reliés par des arcs.[20]

Viollet-le-Duc, à propos de la liberté créatrice atteinte par les bâtisseurs de la fin du gothique, affirmait que ceux-ci pouvaient voûter n'importe quelle forme : quelle que soit la figure en plan, le problème à résoudre revient toujours à devoir couvrir la surface avec des triangles et des arcs qui se contrebutent à leur sommet. [21.]

Le système de triangulation permet d'obtenir un maximum de régularité et d'uniformité avec des éléments de plus ou moins la même portée distribués uniformément sur la surface de manière à créer une forme rigide.[22]

Ainsi, la voûte de la nef de Jerónimos acquiert sa forme à travers une combinaison de triangles qui se contrebutent et qui permettent de créer une surface régulière et ininterrompue à son sommet. Les arcs traditionnels sont remplacés par des paires de triangles, il n'y a plus aucune division entre les travées et les nefs. L'arc de cercle de la ligne de faîte est translaté longitudinalement sur une surface triangulée.

[18] DE JONGE, K., « Scientie et experientie dans le gothique moderne des anciens Pays-Bas », in Actes des Quatrièmes rencontres d'architecture européenne, *Le Gothique de la Renaissance*, 12-16 juin 2007, Chatenet M., De Jonge K., Kavaler E., Nussbaum N. (Eds.), Picard, Paris, 2011, pp. 199-216.

[19] DÍAZ, Enrique Rabasa, *Forma y Construcción en Piedra. De la cantería Medieval a la Stereotomía del siglo XIX*, Ediciones Akal, Madrid 2000, pp. 138-140.

[20] PALACIOS GONZALO, José Carlos, "Geometric Tools in Juan De Alava's Stonecutting, Workshop", in *Nexus Network Journal 11*, Kim Williams Books, Turin , 2009, p. 332.

[21] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 4, p. 7.Librairie, Imprimeries réunis, Paris, 1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle

[22] MAINSTONE, Rowland, *Developments in Structural Form,* MIT Press, Cambridge, MA, 1975, p. 160.

Nous avons trouvé que l'élévation de cette voûte part d'un principe gothique couramment utilisé pour les croisées d'ogives : un arc de circonférence de diamètre égal à la longueur de la diagonale en plan détermine la hauteur de la clef centrale de chaque travée (Figure 118). Si l'on réunit les trois points des clefs centrales de chaque nef, on peut tracer l'axe transversal, qui est la ligne faîtière courbe. Tel aurait été le moyen de garantir la stabilité de la construction, en maintenant les proportions de la croisée d'ogives.

Nous avons tracé l'élévation des nervures à partir de la ligne faîtière. Cependant, comme environ un tiers des clefs ne se trouvent pas sur l'axe, on peut supposer que Castilho aura utilisé des dessins en coupe pour établir leurs hauteurs avec précision afin de déterminer la forme de la voûte. Cette méthode aurait été avancée pour l'époque.

La réutilisation du berceau pour créer une forme nouvelle s'est traduite par l'adoption de solutions innovantes tant au niveau de la conception que de la construction.

Dans les tracés de l'époque, l'élévation du plan des nervures ne résulte pas d'une projection en coupe. La coupe telle que nous la connaissons aujourd'hui s'annonce déjà à l'époque gothique (entre autres chez Villard de Honnecourt), mais elle ne se développera pleinement qu'à partir du début du 16ème siècle, entre autres sous l'influence des traités italiens. [23]

[23] DÍAZ, Enrique Rabasa, *Forma y Construcción en Piedra. De la cantería Medieval a la Stereotomía del siglo XIX*, Ediciones Akal, Madrid 2000, pp. 225-229.

Le tracé des nervures en élévation, trouvé dans les plans d'archive des travaux de restauration de 1927-30 de la DGMN, font état de nervures en arcs de cercles de différents rayons. Cela suppose une construction complexe tant pour l'exécution des cintres que pour la taille des pierres, qui auraient besoin d'un biveau différent par nervure. Cependant, nous savons que la standardisation des nervures est documentée depuis le 13ème siècle.

L'hypothèse de conception que nous avons présentée nous semblait assez claire au niveau du plan, mais nous ne comprenions la méthode d'élévation des nervures que partiellement. Quelle méthode de tracé pourrait sous-tendre la création de cette forme en berceau, selon les principes d'élévation du plan utilisé à l'époque ? Et l'élévation du transept ? Cet aspect qui nous semblait extrêmement complexe a constitué un de nos principaux objets de recherche.

D'autre part, nous voulions comprendre comment cette forme avait été matériellement concrétisée. Comment nous représenter la construction des voûtes à nervures d'une telle complexité ?

La bibliographie et les manuscrits de l'époque sont lacunaires en ce qui concerne les méthodes de construction. L'objet de la présente étude est également d'apporter une contribution à la compréhension des méthodes de construction.

Une question parallèle, qui n'a pas été posée au départ, s'est fait jour au cours de nos recherches : quelle terminologie utiliser pour définir les différents types des voûtes à nervures? Quelle typologie adopter ?

Il importait de comprendre cet aspect, tant pour l'analyse architecturale et structurelle, que pour l'analyse historique, afin de pouvoir comparer les voûtes de pays différents.

La typologie courante est celle de la voûte d'ogive, de la voûte en étoile et de la voûte réticulée, par ordre de complexité de nervures. Nous avons relevé d'autres termes, telle que celle de voûtes polynervurées ou à nervures multiples.

Notons que, exception faite de la première (voûte d'ogive), aucune autres catégorie n'indique quel est le type de nervure qui compose la voûte, c'est à dire son essence, son squelette, sa structure. Ainsi, ces termes font surtout référence à la forme que créent les nervures.

Jean Marie Pérouse De Montclos utilise le terme de « voûtes à nervures multiples », mais il écrit aussi « voûtes d'ogive avec tiercerons et liernes »[24], désignation qui est cependant très peu utilisée dans la bibliographie comparée à « voûtes en étoile ».

Nous avons créé une typologie de voûtes à nervures qui tient compte des types de nervures qui composent la voûte, en examinant leurs formes et leur composition. Nous partons du principe que c'est la nervure qui est à l'origine de la forme et de la structure et que c'est donc avant tout la nervure qui détermine la typologie des voûtes à nervures.

[24] PÉROUSE De MONTCLOS Jean Marie, *Architecture : Vocabulaire*, Imprimerie Nationale, Paris, 1989, p. 280.

Méthodologie et structure de la thèse

Pour répondre aux questions et aux objectifs que nous venons d'exposer, nous avons effectué plusieurs études, qui structurent les quatre chapitres de notre thèse :

1) João de Castilho et son œuvre.

En premier lieu, il faut se familiariser avec le personnage de João de Castilho et avec les bâtiments qui lui sont attribués. Ce chapitre fait l'état de la question des ouvrages attribués à cette architecte.

Nous commencerons ce chapitre en évoquant le cadre historique et culturel du style manuélin. Nous nous pencherons en particulier sur les traités d'architecture qui circulaient à l'époque. Au Portugal, on n'a pas conservé de tracés des voûtes ni d'autres dessins architecturaux comme on peut en trouver ailleurs en Europe. C'était la seule manière d'évaluer les idées qui circulaient à l'époque et qui ont pu influencer l'architecture de João de Castilho.

Nous avons d'abord consulté la bibliographie historique existante sur Castilho même, afin de connaître ses origines, sa formation et son parcours professionnel. Nous avons ensuite consulté les ouvrages bibliographies qui traitaient de ses réalisations, ce qui nous a permis, de comprendre d'une part les arguments des auteurs concernant les attributions et de l'autre l'évolution constructive de ses réalisations. Pour compléter la recherche bibliographie, nous avons consulté les documents d'archives, afin d'évaluer l'authenticité des voûtes et de trouver des documents écrits,

notamment des dessins ou des photos, qui pourraient apporter un éclairage plus technique sur les détails constructifs.

2) Voûtes à nervures gothiques.

Nous nous sommes penchés sur l'architecture du gothique tardif en Europe afin de resituer l'architecture de Jerónimos dans un cadre plus large. Ce chapitre permet d'en savoir plus sur les méthodes de tracé et de construction en usage à la même époque. Nous avons repris ces méthodes pour étudier les voûtes de João de Castilho. Le tracé des voûtes portugaises est un sujet qui n'a jamais fait l'objet d'étude.

Nous avions un intérêt particulier pour plusieurs pays : l'Espagne (pays d'origine de João de Castilho, d'où il apporte les nervures courbes), l'Allemagne (qui a introduit les nervures courbes et les églises-halles en Espagne) et l'Angleterre (de par les ressemblances formelles et structurelles des voûtes anglaises avec les voûtes de la nef de Jerónimos).

Nous nous sommes basés sur la bibliographie et sur nos observations sur place aux monuments que nous avons visités.

Récemment, suite à la publication sur Internet de l'université polytechnique de Madrid, www.bovedasgoticasdecruceria.com, animée par notre promoteur de thèse Professeur José Carlos Palacios Gonzalo, nous avons pu élargir nos connaissances sur le sujet, grâce au riche inventaire photographique qui y est repris, surtout pour les voûtes espagnoles.

Nous aborderons l'Angleterre et la France d'abord et ensuite l'Allemagne et l'Espagne plus en profondeur. Dans cet ordre, nous partirons des voûtes plus simples en ogive aux plus complexes, réticulées et à *combados*, qui intéressent plus directement notre étude. Notre but a été d'explorer le rôle et les fonctions diverses des nervures afin de mieux comprendre les exemples portugais. Le lecteur ne trouvera pas ici un inventaire exhaustif des voûtes à nervures gothique, ce qui n'était pas notre propos.

Afin de resituer l'œuvre de Castilho en contexte portugais, nous avons analysé des bâtiments religieux datés entre 1450 et 1552, période qui commence cinquante années avant l'arrivée de João de Castilho au Portugal et qui finit avec son décès. Nous avons débordé sur ces dates, pour mener une étude plus élargie des églises-halles au Portugal.

Nous avons d'abord fait une sélection des bâtiments religieux manuélins en nous basant sur la bibliographie et de là, nous avons recherché des documents aux archives de l'IRHU- *Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana*, importante source numérisée qui rassemble les monuments portugais. À partir de ces documents, nous avons resserré notre inventaire, en éliminant plusieurs édifices sans intérêt pour notre propos, et en en rajoutant d'autres en provenance de la bibliographie. Nous présentons en annexe une fiche de chaque monument accompagnée de notre relevé photographique, ainsi que les donnés que nous avons trouvées à l'IRHU et que nous avons considérées pertinentes pour notre étude, à savoir : les données historiques relatives à la datation et à

l'attribution d'une part et des plans à l'échelle identifiant les voûtes analysées d'autre part.

Les voûtes sélectionnées ont ensuite été classées par type de nervures : voûtes en ogives (nervures reliant les supports à la clef centrale), voûtes à tiercerons (nervures reliant les supports aux clefs secondaires), voûtes à liernes (nervures reliant les clefs secondaires), voûtes à *combados* (nervures courbes reliant des clefs secondaires) et voûtes à nervures composées (nervures composées de plusieurs segments).

3) Détails constructifs et analyses structurelles

Avant d'aborder l'étude des tracés et de la construction des voûtes, nous considérons qu'il est important de fournir certaines informations concernant la structure et les détails constructifs des voûtes à nervures, ce qui permettra de mieux comprendre le chapitre suivant.

Nous présentons deux voûtes dont la forme apparente est le berceau : celle de la nef de l'église du monastère de Jerónimos et celle du cloître de l'aumônerie du couvent de Christ à Tomar. L'une est en pierre et l'autre en brique. Pour ces deux cas d'étude, nous avons réalisé des analyses de stabilité, ainsi que plusieurs relevés et diagnostics sur place dans le cadre de projets de conservation que nous avons élaborés pour l'IPPAR (*Instituto Português do Património Arquitetónico*).

Pour Jerónimos, un certain nombre de données proviennent de notre thèse de maîtrise. Pour notre projet de conservation, nous avons coordonné plusieurs études, des relevés topographiques et photogrammétriques, des études de stabilité et des sondages de voûtes au géo-radar. Nous avons la chance de pouvoir accéder à l'extrados des voûtes en 2002 et à l'intrados en 2013, dans le cadre du chantier de conservation lancé par la DGPC (*Direção-Geral do Património Cultural*).

En outre, nous apportons certaines informations concernant le comportement structurel de ces voûtes, leur constitution et leurs détails constructifs.

Les résultats de l'étude de stabilité mettent en lumière le rapport entre la forme en berceau et le rôle des nervures. La connaissance des détails constructifs facilite la compréhension des méthodes de construction, sujet abordé au chapitre suivant.

4) Cas d'études : tracé et construction.

Dans ce dernier chapitre, nous analysons les voûtes de João de Castilho, du point de vue de leur tracé et de leur construction. Nous répondrons à la question que nous avons posée en commençant : comment reconnaître les voûtes de João de Castilho ?

Plus largement, ce chapitre apporte des idées nouvelles sur les méthodes de construction de voûtes à nervures en général, en ce qui concerne le cintrage et la création de la forme.

En tout, nous avons entrepris un important travail sur place pour réaliser le relevé de quarante-trois voûtes. La plupart sont des voûtes attribuées à Castilho, les autres étant reprises à des fins de

comparaison des tracés. Le travail sur place a également inclus l'observation des détails constructifs, des tas-de-charges, des nervures et des clefs, ainsi que l'observation de l'extrados quand cela était possible.

En annexe, nous présentons les résultats des relevés, l'analyse géométrique du plan et de l'élévation, des sections et des plans des voussoirs et les profils des nervures.

Dans le texte, nous présentons des hypothèses de tracé et de construction des voûtes que nous avons relevées. Nous avons dû faire un voyage dans le temps et nous mettre à la place de l'architecte pour pouvoir reconstituer les techniques de tracé et de construction à partir des méthodes utilisées à l'époque.

Nous présentons les voûtes par monument, dans un ordre à la fois chronologique et par ordre croissant de complexité, pour finalement conclure avec la voûte du transept de Jerónimos.

1. JOÃO DE CASTILHO ET SON ŒUVRE

1.1 Cadre historique et culturel

L'œuvre de João de Castilho au Portugal (1509-1552) rentre dans le cadre particulier de la période du Manuélin, style architectural caractéristique du gothique tardif. Le Manuélin commence sous le règne du roi Dom Manuel I (1495-1521) et se prolonge sous le roi Dom João III (1521-1557).

Les grandes découvertes maritimes se sont traduites au Portugal par une ère de prospérité sans précédent qui fut à l'origine d'un essor remarquable de l'architecture religieuse, monastique et privée d'un bout à l'autre du pays.

Cette effervescence attira de nombreux étrangers venus travailler sur les chantiers. Ceux-ci apportèrent avec eux les influences artistiques d'Europe et le goût espagnol mudéjar qui caractérisaient l'architecture manuéline. Il s'agissait principalement d'Espagnols. Les tailleurs de pierre de Cantabrie constituaient près de 80% de l'effectif des ouvriers sur les principaux chantiers manuélins. On les appelait *biscainhos*, les Biscaïens[25].

Lisbonne entretenait déjà des relations commerciales avec les Flandres, l'Irlande, l'Espagne centrale et l'Italie. Les rapports avec l'Espagne s'intensifièrent, comme en témoignent les trois mariages du roi Dom Manuel I avec deux filles et une sœur des rois espagnols.

À l'instar de l'Espagne, le grand ordre religieux de l'époque, celui qui était particulièrement privilégié par les rois, était l'ordre hiéronymite de Saint Jérôme (São Jerónimo), qui a beaucoup contribué à la diffusion du style manuélin.

Toute la production artistique manuéline est ainsi empreinte d'un esprit de triomphe, de pouvoir et d'abondance. Les portails sont décorés à la manière de l'architecture éphémère des arcs de triomphe, décorés de sujets naturalistes et grotesques évoquant les fêtes populaires. La noblesse appose des signes distinctifs sur ses maisons décorées de tours, comme des fortifications. Les emblèmes de la royauté sont fréquemment apposés dans les lieux de culte. L'architecture se met au service de l'exaltation du pouvoir royal, divinisant le souverain qui est représenté surtout aux portails des églises. Le pouvoir du roi est également symbolisé dans les piloris et les cheminées, surdimensionnées comme au palais royal de Sintra. Et bien sûr, la Tour de Belém, le plus emblématique de ces symboles.[26]

Cette présence insistante de l'ornementation a couramment fait juger le Manuélin comme un style décoratif. Mais on retrouve les

[25] GENIN, Soraya, MOREIRA, Rafael y De JONGE, Krista, "As igrejas-salão portuguesas: A inovação de João de Castillo", in *La Arquitectura Tardogótica Castellana entre Europa y América,* Actas del Congresso, Santander, 10-12 Febrero 2010, ALONSO RUIZ, Begoña (ed.), Editorial Silex, Madrid, 2011, pp. 544.

[26] ATANÁZIO, M. C. Mendes, *A Arte do Manuelino, Mecenas, Influências,* Espaços, Editorial Presença, Lisboa, 1984. pp. 71-74.

mêmes motifs décoratifs ailleurs en Europe[27]. La réputation de l'exubérante fenêtre du couvent du Christ de Tomar en est la preuve.

Cependant, l'originalité du Manuélin réside avant tout dans son abordage de la spatialité, qui le distingue de l'architecture européenne de son époque. Les églises-halles sont recouvertes d'une seule voûte et permettent une parfaite continuité de la forme et de la lumière à travers tout l'espace.

L'ornementation est disposée de manière non aléatoire sur des éléments bien précis, tels que les portails, les fenêtres, les corniches, les pinacles, les consoles, les clefs et les piliers Son rapport avec l'architecture est tellement étroit que les colonnes prennent des formes torsadées (église de Jésus de Setúbal, cathédrale de Guarda). Les profonds reliefs des décors, accentués à dessein, créent des jeux d'ombre et de lumière qui contrastent avec le dépouillement des murs et avec l'ouverture de l'espace.

Les éléments de la décoration sont variés : fruits, animaux, figures anthropomorphique, motifs géométriques. La représentation de personnages humains complets est rare et on aura plus de chance de voir, par exemple, un masque dissimulé dans un feuillage. La végétation et l'héraldique sont prédominantes et elles sont fréquemment apposées aux endroits stratégiques des édifices.

L'héraldique est récurrente dans les décors de l'architecture manuéline : statues des rois aux portails, couronnes royales, croix de l'Ordre du Christ, armoiries et sphères armillaires, sigles R.M (Roi Manuel), blasons.[28]

La thématique de la nature s'inspire du travail du bois. On estime même que cette influence s'étend jusqu'aux voûtes à nervures.

L'architecture manuéline englobe tant les ouvrages traditionnels dans lesquels ne varient que l'ornementation et la proportion, que les ouvrages plus novateurs influencés par la Renaissance.

Les églises de la première période du Manuélin ont une nef rectangulaire à cinq travées, sans transept, avec un chevet quadrangulaire à une ou deux travées flanquées parfois de chapelles, de piliers simples ou de section circulaire ou octogonale, d'arcs divisant les nefs, tantôt surbaissés tantôt en plein cintre, et des décors ornant les colonnes et les arcades. On ajoute à ce groupe les églises matrice de Caminha, de São João Baptista à Tomar, de Jésus de Setúbal, Conceição à Beja et São João Baptista à Moura. Parfois, les façades comportent une tour donnant accès à la nef centrale, comme à la cathédrale d'Elvas, ou de deux tours saillantes, comme à l'église matrice de Viana do Castelo ou la cathédrale da Guarda. [29]

La largeur et la hauteur des nefs tendent à être identiques, à la manière de la Renaissance, contrariant la verticalité gothique. Les arcs brisés sont remplacés par des arcs surbaissés ou des arcs de

[27] À ce sujet voir *Le Gothique de la Renaissance: actes des quatrièmes rencontres d'architecture européenne*, De Jonge, Krista, Ed. Chatenet, Monique, Ed. Kavaler, Ethan Matt, Ed. Nussbaum, Norbert, Ed. De Architectura, Paris, Picard, 2011.

[28] CHICÓ, Mário Tavares, A Arquitectura Gótica em Portugal, Livros Horizonte, Lisboa, 2005.pp. 71-74.

[29] CHICÓ, Mário Tavares, *A Arquitectura Gótica em Portugal, Livros Horizonte, Lisboa, 2005*, pp. 153-155.

cercle, et les voûtes sont de plus en plus surbaissées et plates. Les piliers sont remplacés par des consoles et les chapiteaux se font plus discrets jusqu'à disparaître. La création d'une vision diagonale et d'un espace unifié devient une caractéristique principale du Manuélin.

On associe communément aux trois phases du gothique portugais le nom de trois grands monastères portugais : Alcobaça, Batalha et Belém.[30]

C'est au monastère de Batalha que sont introduites, au Portugal, les voûtes en étoiles, par l'architecte Huguet entre 1401 et 1438.

L'origine d'Huguet est sujette à caution : Angleterre, France ou Espagne.[31]

Pendant tout le 15ème siècle, le chantier de Batalha fut un important creuset d'influences artistiques. On y trouve alors des étrangers de diverses nationalités venus principalement du nord de l'Europe et d'Espagne. On y vit travailler notamment Luís Alemão (1438), João de Flandres (1443), João de Aragão (1457-1476), Alvaro Eillan (1459-1462), João Rodrigues Alemão (1471), Diogo del Castilho (1477) et Tornilhes de Lião (1508).[32]

L'importance particulière de ce monument provient de la volonté des rois portugais d'en faire leur mausolée, le roi Dom João I d'abord avec la *Capela do Fundador*, et ensuite son fils Dom Duarte, avec les chapelles *imparfaites*.

Senos explique l'importance des monuments en s'appuyant sur cette volonté des souverains d'en faire leur sépulture. C'est d'ailleurs cette raison qui explique pourquoi certains ouvrages seront progressivement abandonnés au profit d'autres, comme on le voit avec les exemples de Batalha et de Belém.

Depuis 1509, Dom Manuel s'intéresse à Belém au détriment des chapelles imparfaites de Batalha qu'il finira par laisser inachevées.

Dom João III, qui avait aussi l'intention de s'y faire inhumer, s'est intéressé à l'église de Graça à Évora et ensuite, peu de temps après, il change encore d'avis en faveur de Tomar et de son Ermitage de Conceição.[33]

Pour Senos le vestibule de Batalha commandé à Castilho témoigne du changement du goût architectural au Portugal, qui abandonne le gothique « à la moderne » pour devenir définitivement « à la

[30] Damião e Peres direcção, Eleutério de Sousa, *"Historia de Portugal. Edição monumental comemorativa do 8º centenário da fundação da nacionalidade*", Portucalense editora, 1932, pp. 365; MARQUES, Lina"O Claustro do mosteiro de Santa Maria de Belém" in *Cadernos de História da Arte*, 1991, p.42. On divise habituellement le gothique portugais en 5 phases : 1) 1200 à 1235 ; 2) 1235 à la fin du 13ème siècle ; 3) le 14ème siècle ; 4) le 15ème siècle ; 5) les premières décennies du 16ème siècle, correspondant au manuélin.

[31] MARTÍNEZ, Javier Gómez, SILVA, Ricardo, "Huguet, Boytac y el Tardogótico peninsular", *in O largo tempo do renascimento. Arte, propaganda e poder*, pp. 312-316.

[32] MARTÍNEZ, Javier Gómez, SILVA, Ricardo, "Huguet, Boytac y el Tardogótico peninsular", in *O largo tempo do renascimento. Arte, propaganda e poder*, p.331.

[33] SENOS, N., "João de Castilho e Miguel de Arruda no mosteiro da Batalha", *in Murphy* nº 2, 2007, pp. 12.

romaine ».[34]

À l'époque du manuélin, on trouvait facilement au Portugal des manuscrits et des traités d'architecture, source majeure de transmission du savoir artistique. Ces ouvrages étaient disponibles chez les mécènes, les artistes et les architectes de l'époque, comme nous le disent Ana Rodrigues et Rafael Moreira dans leur récente publication *Tratados de Arte em Portugal*.

Rodrigues nous présente une liste des traités d'architecture qui circulaient à l'époque au Portugal :[35] Leon Battista Alberti, *De Re aedificatoria*, Florence, 1485 ; Luca Pacioli, *Somma de aritmética, geometria, proporzioni e proporzionalitá* , Venise, 1494 ; *De Architectura* , de Vitruve, plusieurs éditions dès 1513, traduit en 1541 par Pedro Nunes ; *Medidas del Romano*, premier tome, de Diego de Sagredo, daté de 1526, Tolède ; *Regole Generali di Architectura*, le livre IV, Sebastiano Serlio, Venise, 1537 ; et *I dieci libri de l'Architectura*, d'Alberti, Venise, 1547.

Les traités qu'on trouvait au Portugal entre le 15ème et le 18ème siècle étaient surtout rédigés en latin, en espagnol, en français et en italien. Entre le 15ème et le 18ème siècle prédominent les traductions espagnoles et françaises, et au 16ème les traités italiens en italien. Il n'y a pas eu beaucoup de traduction en portugais avant le 18ème siècle. La première mention d'un traité anglais ou allemand est une traduction italienne de 1783, de John Joachim Winckelmann, *Geschichte der kunst des Alterhums* (1764).[36]

Il existe plusieurs éditions italiennes de Serlio et de Vignola entre 1544 et 1551. Il est intéressant de lire les commentaires à leur propos. Selon Rodrigues, le traité de Serlio (1475-1554) a eu beaucoup de succès parce qu'il était bien illustré, contrairement à celui d'Alberti, illustré seulement en 1550. À propos de Serlio, l'auteur commente ses plans abstraits et les proportions faites au compas seulement, sans aucun calcul mathématique. Rodrigues remarque l'influence de Serlio dans plusieurs bâtiments portugais. Dans le cas du couvent du Christ à Tomar, l'auteur hésite et penche plutôt en faveur de l'influence du manuscrit de Francisco de Holanda, qui circulait beaucoup à l'époque.

Au Portugal, il existe quatorze exemplaires de Vignola (1507-1573), dont deux premières éditions sont également bien illustrés sur les ordres classiques. Les formes et les dimensions se basent sur une nouvelle méthode qui est très simple à utiliser : le module. Ce traité n'a été traduit en portugais qu'au 18ème siècle.

Nous remarquons que le traité de Vignola présente des plans en

[34] SENOS, Nuno, 'João de Castilho e Miguel de Arruda no Mosteiro da Batalha', in *MURPHY: Revista de História e Teoria da Arquitectura e do Urbanismo / Journal of Architectural History and Theory*, Imprensa da Universidade de Coimbra, Julho, 2007, p. 118.

[35] RODRIGUES, Ana Duarte, "The circulation of art treatises in Portugal between the XV and the XVIII centuries: some methodological questions", in *Tratados de Arte em Portugal,* (coord. MOREIRA, Rafael; RODRIGUES, Ana Duarte), Scribe, Lisboa, 2011, pp. 21-42

[36] RODRIGUES, Ana Duarte, "The circulation of art treatises in Portugal between the XV and the XVIII centuries: some methodological questions", in *Tratados de Arte em Portugal,* (coord. MOREIRA, Rafael; RODRIGUES, Ana Duarte), Scribe, Lisboa, 2011, pp. 22-27.

section verticale. Vignola commence en décrivant le point, la ligne et d'autres éléments de géométrie et il termine en décrivant l'arc continu tracé à l'aide de plusieurs courbes. Il mentionne deux fois le mot « section », à propos des plans d'une petite maison et pour un escalier repris aux planches 33 et 40.[37] On constate que la section était une représentation graphique comme on en fait actuellement. Le mot « élévation » est utilisé pour le dessin de la façade. D'ailleurs, on retrouve la méthode actuelle de tirer l'élévation directement à partir du plan à la planche 9, pour une base de colonne et à la planche 20 pour un chapiteau corinthien.

Vitruve désigne le carré et le triangle comme les figures principales et fondamentales de l'architecture[38].

Rafael Moreira fournit des informations plus précises sur le traité de Vitruve au Portugal, que nous allons résumer.[39]

Dès 1488, il existait au Portugal un exemplaire de l'ouvrage vitruvien, qui était la première édition publiée à Rome en 1486. Ce livre avait été apporté par l'archevêque Dom Jorge da Costa (1488-1500) qui était arrivé de Rome au Portugal en 1488 pour devenir l'archevêque de la cathédrale de Braga. Le manuscrit de Vitruve a peut-être aussi été apporté de Florence au Fort de Sagres, où les savants de l'époque se rencontraient pour débattre leurs idées.

L'auteur situe entre 1537-1541 la date de la traduction précoce de Vitruve en portugais par le mathématicien Pedro Nunes, sous le règne de Dom João III, « première traduction du latin vers une langue vulgaire (à part l'italien) ». En est la preuve le traité de Pedro Nunes *De Crepusculus* de 1541 dans lequel cet auteur s'excuse d'avoir mis si longtemps pour conclure la traduction de l'ouvrage de Vitruve. Dans la première édition allemande, Walter Ryff remercie d'abord Serlio et ensuite Pedro Nunes, lequel entretenait des rapports avec l'École de Nuremberg. Le manuscrit de Pedro Nunes reprend l'inventaire de la bibliothèque de Francisco de Mora, successeur de Juan de Herrera, qui l'a peut-être apporté de Lisbonne.

Notons qu'en Espagne le traité de Vitruve a été traduit en 1582[40]. En Allemagne, la traduction de Vitruve date de 1548.

Moreira fait référence à deux auteurs de l'époque de Vitruve, qui le citent : le mathématicien Francisco de Melo, en 1515-20, le chroniqueur João de Barros en 1531 et le savant João de Castro en 1538.

[37] VIGNOLA, Giacomo Barozzi da, *Regras das Cinco Ordens de Architecture,* traduction de José Calheiros de Magalhães Andrade, Coimbra, Imprensa da Universidade, 1787, pp. 11; 55-59.

[38] Hofstadt comente les figures géométriques utilisées par Vitruve dans les feuilles 27 à 30. HOFFSTADT, Frédéric, *Principes du Style Gotique, exposés d'après des documents authentiques du Moyen Âge* avec 40 planches in-folio, à l'usage des artistes et des ouvriers. Traduit de l'Allemand par Théodore Aufschlager. Liège: E. Noblet, 1851, p.129.

[39] MOREIRA, Rafael, « A mais antiga tradução europeia de Vitrúvio. Pedro Nunes em 1537-1541., in *Tratados de Arte em Portugal*, (coord. MOREIRA, Rafael; RODRIGUES, Ana Duarte), Scribe, Lisboa, 2011, pp. 51-61.

[40] MARTINEZ, Javier Raposo, "Terminologia arquitectónica del Libro III del De Architectura de Vitruvio en la primera edición española de 1582 de Miguel de Urrea", in *Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción*: Santiago de Compostela 26-29 octobre 2011, eds. S. Huerta, I. Gil Crespo, S. García, M. Taín. Madrid, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 1157.

Dans sa première traduction de Vitruve en italien de 1521, Cesario Cesariano ajoute des gravures et des commentaires à ce texte qui ont grandement influencé le milieu artistique. Il existe deux exemplaires de cette traduction à la bibliothèque d'Evora et à la bibliothèque municipale de Porto. Ces exemplaires étaient probablement consultés à l'époque, puisqu'on retrouve leur influence dans plusieurs édifices de l'époque, dans les détails décoratifs et structurels, entre autres chez Nicolau de Chanterenne et Miguel de Arruda.

À Tomar, Moreira remarque le type de colonnade de l'étage supérieur du cloître hospitalier du couvent de Christ et la chapelle de Conceição. John Bury en 1981 et Fernando Marías en 1986 ont remarqué l'influence des gravures de Cesariano (planches 52 et 54) dans cette chapelle. Rafael Moreira, dans sa thèse, compare la chapelle de Conceição avec le mausolée d'Ânia Regila, sur la Via Appia.

Selon Moreira, la décennie de 1530 constitue un moment-clef de l'architecture et de la sculpture au Portugal. En 1529, les écrits officiels utilisent pour la première fois l'expression « à la romaine » (*ao romano*), terme qui dénote une distanciation avec le gothique tardif manuélin, lequel était pourtant qualifié de « moderne » à l'époque.

1.2 Origine, formation et influences artistiques.

João de Castilho (vers 1470-1552) est né dans la région de Cantabrie en Espagne. Une lettre noblesse concédée à ses descendants, datant de 1555, le dit originaire de la région de Transmiera, descendant en ligne directe de la maison des Castillo[41]. Castilho serait venu au Portugal plus de cinquante ans auparavant, soit à la fin du 15ème siècle ou au début du 16ème siècle.[42]

Il a commencé à signer son nom *Juan del Castillo*, pour ensuite adopter la graphie portugaise *Jnº de Castylho*.[43] Il se marie au Portugal, pays où il restera jusqu'à sa mort après avoir participé activement aux chantiers les plus importants qui ont été réalisés au Portugal (continental et d'outre-mer) au cours de la première moitié du 16ème siècle.

Figure incontournable de l'histoire de l'art et de l'architecture portugaise, João de Castilho est ainsi lié à des édifices de premier plan au Portugal, que ce soit par leur importance historique ou par leur valeur architecturale, tels que le monastère des Hiéronymites (*Jerónimos*) à Lisbonne, le couvent du Christ de Tomar, le

[41] SÁ, María Ealo de, *El arquitecto Juan de Castillo, El constructor del Mundo*, Santander, Colegio Oficial de Arquitectos de Cantabria, 2009, p.55.
[42] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Lisboa, Imprensa Nacional, Vol.I, 1899, pp.201-202.
[43] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal. A Encomenda Régia entre o Moderno e o Romano.* Thèse de doctorat en Histoire de l'Art. Lisbonne. Universidade Nova de Lisboa, 1991, p. 433.

monastère Santa Maria da Vitória à Batalha, le monastère d'Alcobaça ou la forteresse de Mazagão (*El-Jadida*) au Maroc.

Le texte de Rafael Moreira, *João de Castillo - Construtor do Mundo*[44], qui est partiellement repris dans notre dernier article commun, constitue une source biographique extrêmement riche, dont nous traduisons ici certaines parties : « Depuis toujours, on situe ses origines à Trasmiera : les ouvrages de généalogie regorgent de détails sur la famille Castilho, laquelle a produit des politiciens, des diplomates, des poètes et des hauts fonctionnaires jusqu'au 20ème siècle. Mais toujours soucieuse de « redorer » ses véritables origines, elle fit de João un fils de la noble dynastie des Solórzano y Castillo, seigneurs de Torre de San Pedro, plutôt que de Castillo, en Trasmiera. (…) Castillo n'était pas originaire des campagnes côtières planes et urbanisées de la commune de Cudeyo, mais il a grandi dans des vallées solitaires, en des lieux isolés de Miera et d'Asón, au cœur de la « Montaña », sur des terres de pierre et de fer. C'est là qu'il aura passé sa jeunesse, en faisant probablement son apprentissage de tailleur de pierre auprès de quelque bon maître de la région, tout en suivant, sous l'influence de son père, des études de grammaire et de latin, de géométrie et de mathématique. Il était ainsi devenu un homme cultivé, contrairement à la plupart des tailleurs de pierres de l'époque, analphabètes pour la plupart » (…) Au Portugal, son activité fut d'une importance telle que « Son pays le rétribua en le couvrant d'honneurs – il fut anobli avec droit de porter des armoiries (qu'il n'a jamais utilisées mais que ses enfants n'ont pas manqué de revendiquer dès après son décès). Il était chevalier de l'Ordre du Christ et ses amis appartenaient aux meilleurs cercles sociaux et culturels. Son unique fille fut baptisée dans la cathédrale d'Évora en 1537, avec pour parrain l'insigne humaniste Damião de Góis, qui était un ami de Dürer et d'Érasme – auquel il fut cependant peu lié, tout absorbé qu'il était par son travail (…) Malgré sa modestie silencieuse, on s'étonnera peu qu'il fût devenu le plus bel exemple d'ascension sociale qu'on ait pu connaître. Son fils António, docteur de l'université de Coimbra, fut grand chroniqueur du royaume, un poète comparé à Camões et qui fut ambassadeur à la cour de la reine Élisabeth I d'Angleterre. Et son neveu, Dom Pedro de Castilho, fils de son demi-frère Diogo (de 15 ans plus jeune que lui et qui le suivit au Portugal en 1516, à Coimbra, où il devint maître d'œuvre des travaux de l'université et une figure éminente de la société), fut évêque des Açores et, à deux reprises, vice-roi, remplaçant le roi Philippe III d'Espagne (Philippe II du Portugal). Le fils d'un modeste tailleur de pierre immigré qui devient vice-roi, voilà qui est assurément inédit ».

[44] GENIN, Soraya ; MOREIRA, Rafael ; De JONGE, Krista, 'As igrejas-salão portuguesas. A inovação de João de Castillo', in ALONSO RUIZ, Begoña (Ed.), *La arquitectura Tardogótica castellana entre Europa y América*. Madrid, Editorial Silex, 2011, pp. 543-546. MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal. A Encomenda Régia entre o Moderno e o Romano.* Thèse de doctorat en Histoire de l'Art. Lisbonne. Universidade Nova de Lisboa (polic.), 1991, vol. I, pp. 421-22. L'origine de Castilho se base sur un manuscrit datant du début du 17ème siècle, de Tristão Vieira de Castro, qui révèle que João de Castilho était un fils illégitime de l'abbé de Liérganes, Diego de Castillo, d'une branche appauvrie de la famille des Castillo de la lignée Arnuero, et de Mencía, une femme de Rubalcaba, de Vale do Miera. João de Castilho fut élevé chez sa tante, Dona Isabel de Castillo, mariée dans la ville d'Arredondo, près de Rasines, Vale do Asón. Manuscrit de Tristão Vieira de Castro: *"Famílias de Vários Autores",* Biblioteca Nacional da Ajuda, Ms. 49-XIII-29, fols. 56-65.

Les architectes de l'époque pouvaient être très respectés, bien gagner leur vie et prétendre à un niveau social élevé grâce à leurs connaissances et aux influences dont ils pouvaient bénéficier.[45] Cela aura sans doute été le cas de João de Castilho, qui se faisait accompagner d'un groupe d'ouvriers et de spécialistes dans les arts du métier et qui n'hésitait pas à réclamer des suppléments quand il faisait plus que ce qui était prévu. À Vila do Conde, il a ainsi changé les plans prévus pour la façade.[46] D'autre part, son mariage lui apporte une assise familiale et économique qui conforte son ascension sociale puisqu'on sait que João de Castilho se marie en 1513 dans la ville portugaise de Freixo de Espada-à-Cinta avec la fille d'un Biscaïen marchand d'armes de fer originaire de Pámanes (Liérganes), un mariage dont Moreira dit qu'il consacra une « véritable association d'entreprises ».[47]

Avant de venir au Portugal, Castilho fait son apprentissage à Santander, une région privilégiée, réputée pour ses célèbres tailleurs de pierre. Ses contemporains sont Juan Gil de Hontañón (1480-1526), père de Rodrigo Gil de Hontañón, et Juan de Rasines (1490-1542), tous deux nés et formés à Rasines, à quelques kilomètres d'Arredondo, où vécut Castilho. Un peu plus loin habitaient les parents de Juan de Herrera, l'architecte du palais de l'Escorial.[48]

En observant les églises de sa région natale, on retrouve plusieurs exemples de voûtes qui sont caractéristiques de João de Castilho, ce qui ne nous laisse aucun doute sur sa formation. Des types de voûtes à liernes et à nervures courbes, centrés sur des tiercerons en forme d'étoile à quatre branches, ce qu'on appelle au Portugal l'architecture *biscainha*. Nous aborderons la typologie des voûtes espagnoles au chapitre suivant.

S'appuyant sur des sources documentaires, Ealo de Sá décèle diverses influences et relations artistiques étrangères dans le parcours de João de Castilho. En Espagne, Castilho connaissait certainement la *Lonja* de Valencia, dont la plupart des ouvriers étaient originaires de Cantabrie, du Pays basque, du Portugal et d'autres pays. Dans la liste des tailleurs de pierres qui participèrent aux travaux, on retrouve les noms *Joan de Castelle* en 1497, *Joan de Cassel* en 1494 et *Simon de Castillo* en 1503. Sa famille avait des rapports professionnels avec les Flandres, l'Angleterre et l'Italie. Diego de Castillo était poète de la cour napolitaine et on trouvait des

[45] BUCHER, François, Architector, The Lodge books and sketchbooksof medieval architects, vol. 1, New York, 1979. pp.12-13. L'apprentissage de l'architecte en Allemagne durait de 3 à 7 ans sous la supervision d'un Maître, on voyageait ensuite pendant un an et on visitait d'autres loges. Après un examen on devenait « maître » et on créait sa marque de tailleur de pierre.

[46] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal. A Encomenda Régia entre o Moderno e o Romano.* Thèse de doctorat en Histoire de l'Art. Lisbonne. Universidade Nova de Lisboa, 1991, pp. 432-438.

[47] GENIN, Soraya ; MOREIRA, Rafael ; De JONGE, Krista, 'As igrejas-salão portuguesas. A inovação de João de Castillo', in ALONSO RUIZ, Begoña (Ed.), *La arquitectura Tardogótica castellana entre Europa y América*. Madrid, Editorial Silex, 2011, pp. 543-546.

[48] Juan Gil de Hontañón a son premier travail à Segovia, associé à l'école de Juan Guas, et a participé aussi à la cathédrale de Palencia et Salamanca en 1512-13 et à la cathédrale de Séville jusque 1516. Les maîtres et tailleurs de pierre de la région de Santandér, notamment les Rasines ont été très bien étudiés par ALONSO RUIZ, B., *Arquitectura tardogótica en Castilla: los Rasines*, Universidad de Cantabria/Colegio de Arquitectos de Cantabria, 2003.

marchands de la famille des Castilho à Naples, Florence, Gênes et dans d'autres villes italiennes. Un *Juan del Castillo* menait des activités à Florence et à Rome tout au début du 16ème sc.[49]

Moreira fait remarquer que l'influence de la Renaissance sur Castilho a pu provenir directement de sa région natale, puisque, à la même époque, y naissait également Jerónimo Quijano, un des grands noms espagnols de la Renaissance. À Belém, chantier portugais aux nombreuses influences artistiques, on trouvait des étrangers, notamment franco-flamands. En 1529, il part au Maroc avec le capitaine Duarte Coelho qui avait longtemps séjourné en Italie, ce qui, selon Moreira, constitue son premier contact avec le goût italien. Il a pu consulter les traités d'architecture qui circulaient à l'époque, par exemple le traité de Diego de Sagredo, *Medidas del Romano*, qui a été imprimé en 1526, et le *De Architectura* de Vitruve dont il existait un exemplaire au Portugal depuis 1488 et dont le roi Dom João III avait ordonné la traduction, laquelle sera effectuée entre 1537 et 1541.[50]

Lors du séjour de João de Castilho au Maroc pour superviser le grand ouvrage militaire de la forteresse de Mazagão (actuellement El-Jadida), celui-ci a pu connaître le projet de l'italien Benedetto de Ravena.[51]

L'esprit humaniste de Castilho se retrouve dans son architecture. À Jerónimos, il se représente de profil sur le fût de la colonne nord du transept, selon Moreira (Figure 5), face à l'autel, à l'endroit ou étaient représentés les rois[52]. Récemment, une reproduction de ce portrait a été apposée à l'entrée de l'église San Pedro de Castillo en hommage à João de Castilho. Avant Jerónimos, Castilho avait déjà fait figurer son nom sur la porte du couvent du Christ de Tomar, *João de Castilho construiu em 1515* (Figure 3). [53] Un autre portrait a été identifié dans la salle *das Cortes* à Tomar. [54]

La cathédrale de Burgos constitue une des premières expériences de Castilho sur un grand chantier de l'époque. Il y collabore dès 1487-1488, sans doute grâce à l'influence de son père, puisque la ville de Liérganes appartenait au diocèse de la cathédrale de Burgos. Il travaille avec Simon de Cologne sur la fermeture de la voûte de la chapelle du Connétable (*Condestable*) en 1495. Simon était le fils de l'Allemand Juan de Colonia, qui a introduit les voûtes à nervures courbes pour la première fois en Espagne à la cathédrale de Palencia.

[49] SÁ, María Ealo de, *El arquitecto Juan de Castillo, El constructor del Mundo*, Santander, Colegio Oficial de Arquitectos de Cantabria, 2009, p.88.
[50] MOREIRA, Rafael. 1991, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal. A Encomenda Régia entre o Moderno e o Romano.* Thèse de doctorat en Histoire de l'Art. Lisbonne. Universidade Nova de Lisboa, pp. 471-472.
[51] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Lisboa, Imprensa Nacional, Vol. I, 1899, p.194.
[52] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal. A Encomenda Régia entre o Moderno e o Romano.* Thèse de doctorat en Histoire de l'Art. Lisbonne. Universidade Nova de Lisboa, 1991, p. 460.
[53] DIAS, Pedro, 'João de Castilho e o desenvolvimento da arquitectura manuelina', in *História da Arte em Portugal*, Publicações Alfa, Lisboa, 1986, p. 59.
[54] SÁ, María Ealo de, *El arquitecto Juan de Castillo*, *Documentos históricos*, II Volumen, Merindad de Trasmiera, Santander, 1992, p.42.

C'est à la cathédrale de Séville qu'on pense que Castilho a reçu son titre de « maître ». Il a sans doute suivi Simón de Colonia à Séville en 1495, date attestée de la présence de ce dernier à Séville où il est resté travailler avec Alonso Rodriguez qui dirigeait les travaux. Son nom, *Juan de Castillo,* figure dans un document de 1507[55], pour des paiements comme maçon (*assentador*), auprès de ceux de Pedro de Trillo, qui a également travaillé à Jerónimos, de Juan Garnizo et de Pedro Millan notamment, alors que s'achevait la construction du dôme qui devait s'écrouler quelques années plus tard. *Juan Castillo* est plusieurs fois cité comme le « second de Mestre Alonso Rodríguez, dont il est devenu l'ami au point d'être son exécuteur testamentaire, en 1506 ».[56]

João de Castilho doit l'essentiel de sa formation à Simón de Colonia. On retrouve dans son architecture plusieurs caractéristiques communes, notamment les voûtes à nervures curvilignes (dans le style de celles de la cathédrale de Burgos) et les voûtes en réseaux, comme celles de la chapelle *Nuestra Señora de la Antigua*, à Séville. Dans son architecture, ces deux types de voûtes sont les plus importants et il a su les développer de manière remarquable à Jerónimos. Ce type de structures en réseau fort utile pour couvrir de





Figure 3. Signature de João de Castilho datée de 1515.
Portail de l'église du couvent du Christ à Tomar.



Figure 4. Buste de João de Castilho au monastère de Jerónimos.
(selon Moreira)

Figure 5. Colonne nord du transept de l'église Santa Maria de Belém.

[55] SILVA, Ricardo faisant référence au travail de Juan Estévez sur les tailleurs de pierre à la catédrale de Séville, ESTÉVEZ, Juan Clemente Rodriguez, *Los Canteros de la Catedral de Sevilla – del Gótico al Renacimento*, Diputacion de Sevilla, 1998, p. 408.

[56] GENIN, Soraya ; MOREIRA, Rafael ; De JONGE, Krista, 'As igrejas-salão portuguesas. A inovação de João de Castillo', in ALONSO RUIZ, Begoña (Ed.), *La arquitectura Tardogótica castellana entre Europa y América*. Madrid, Editorial Silex, 2011, pp. 543-546.

grandes portées est à rapprocher de celle de la lanterne de Séville, qui s'est écroulée.

Castilho a également dû emprunter à Simón de Colonia les nervures croisées au niveau du tas de charge, qu'on trouve à Burgos et à Séville, caractéristiques des architectes allemands. Elles sont aussi une caractéristique de Castilho (relevée par Barreira) qu'on retrouve dans le cloître de Jerónimos, sur les arcades à coté des contreforts Renaissance, et à Tomar, dans les pilastres et les arcs qui subsistent du cloître principal, les pilastres et les arcs du croisement des couloirs du couvent et dans la salle du chapitre.[57] Nous en évoquerons d'autres exemples plus loin.

On ne sait pas avec certitude à quel moment Castilho abandonne l'Espagne pour faire carrière au Portugal et les opinions divergent sur ce point.

En 1508, Castilho accompagne Alonso Rodriguez à Setúbal pour un achat de pierre de jaspe destinée au dallage de la cathédrale de Séville[58]. Il serait alors resté au Portugal pour exécuter quelque chantier, comme par exemple celui de l'église du couvent de Jésus à Setúbal, dont la voûte du chœur lui est parfois attribuée.

[57] BARREIRA, João, "O classicismo de João de Castilho", in Sep. da *Revista da Faculdade de Letras*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1934, p.117.
[58] DIAS, Pedro, 'João de Castilho e o desenvolvimento da arquitectura manuelina', in *História da Arte em Portugal,* Publicações Alfa, Lisboa, 1986, p. 51 ; MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal. A Encomenda Régia entre o Moderno e o Romano.* Thèse de doctorat en Histoire de l'Art. Lisbonne. Universidade Nova de Lisboa, 1991, p.427.

Il est également possible qu'il soit allée d'Espagne au Portugal pour travailler à Caminha, comme les Biscaïens qui sont venus en 1496 ou 1497, selon le document *Matrículas de Ordens* de l'archevêché de Braga.[59]

Cette dernière hypothèse invalide sa présence à Séville et à Setúbal, opinion de Sá, qui défend que, à cette occasion, Castilho travaillait sur des chantiers du nord de l'Espagne et du Portugal, notamment les cathédrales de Saint Jean de Compostelle et de Braga ainsi que l'église de Vilar de Frades.[60] Comme nous le verrons plus loin, les rapports entre les voûtes en réseau de Castilho et celles de la cathédrale de Séville sont assez évidents.

1.3 Églises et cathédrales

1.3.1 *Cathédrale de Braga*

Le premier chantier documenté de Castilho au Portugal est celui du chœur de la cathédrale de Braga (annexe PT-Br3), qui date de 1509 et qui est considérée comme le premier bâtiment à nervures courbes au Portugal.

[59] FREITAS, Eugénio Cunha e, "João de Castilho e a sua obra além-Douro", in *Colóquio*, Nº15, 1962; CRUZ, Manuel Braga de, "A Sé de Braga", in *Bracara Augusta*, Nº30, Braga, 1976, pp. 5-6.
[60] SÁ, María Ealo de, *El arquitecto Juan de Castillo, El constructor del Mundo*, Colegio Oficial de Arquitectos de Cantabria, Santander, 2009, p.89.

Le document du 2 juillet 1511 qui attribuait cet ouvrage à Castilho portait en fait sur l'église de Vila do Conde. On y demandait qu'on fît appel, pour construire cette église, à « João de Castilho, maître de la grande chapelle (chœur) de Braga ». [61]

Le document du *Memorial* de Dom Diogo de Sousa, écrit peu d'années après son décès, indique que « ce fut la première chapelle à voûte à nervures courbes (...) qui fut faite au Portugal jusqu'à cette époque ».[62]

En se fondant sur le *Memorial*, Eduardo Pires de Oliveira, effectue une synthèse des travaux qui ont été réalisés du temps de l'archevêque Dom Diogo de Sousa «Son action dans le domaine de l'urbanisme de Braga est très bien connue. (…) On ne connaît pas encore la raison pour laquelle Braga a attiré l'architecte João de Castilho et d'autres artistes de Biscaye. Mais en vérité, le nouveau chœur fut un ouvrage qui plut tellement, que le talent de Castilho fut aussitôt mis à profit dans d'autres édifices de la ville et des localités voisines ; nous nous rappelons de la Casa dos Coimbrãs et de l'église matrice de Vila do Conde.(…) Il [l'archevêque, Nda] a totalement refait le chœur ; apporté des altérations au portail principal (…) a fait relever les quatre arcs de la croisée à la hauteur de celles des nefs qui leur faisaient face (…)» Il a fait « ceindre l'ancien chœur avant de se décider à faire le nouveau ; il a amélioré la structure à la base des murs intérieurs des nefs, de la tribune, des tours, de la façade (…)».[63]

Avant la construction de la voûte du chœur de la cathédrale de Braga, (1488-1501), l'archevêque Dom Jorge da Costa II a fait construire la voûte du porche. [64] L'archevêque n'aurait pas réussi à achever la voûte avant d'être remplacé à son poste par son frère et c'est à Dom Diogo de Sousa qu'on doit l'ornementation extérieure réalisée par des artisans de Biscaye. [65]

Dom Diogo de Sousa (1460-1532) fut évêque de Porto (1495) et archevêque de Braga (1505-1532). Il partit pour l'Italie, avant 1493 et en 1505, pour deux ambassades envoyées par le roi Dom Manuel I. Il connaissait donc de l'art de l'humanisme italien. « Dom Diogo de Sousa, Archevêque de Braga, connaissait Rome et il était culturellement un humaniste et un ami de Dom Manuel. C'est pourquoi, outre ses études à l'université de Salamanque et de Paris, il se servira des Biscainhos pour ériger le chœur de la cathédrale de Braga, l'église de Vilar de Frades, etc. »[66].

[61] SÁ, María Ealo de, *El arquitecto Juan de Castillo, El constructor del Mundo*, Colegio Oficial de Arquitectos de Cantabria, Santander, 2009, p.286.

[62] ATANÁZIO, M. C. Mendes, 'Contributo de João de Castilho para o espaço e estrutura da arquitectura do manuelino, As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos descobrimentos', in, *II Simpósio Luso-Espanhol de História da Arte*, Ed. Minerva, Coimbra, 1987, p.260. La voûte était peinte avant la restauration de 1930. ficha IPA, in www.monumentos.pt.

[63] OLIVEIRA, Eduardo Pires de, *Os grandes ciclos de obras na sé catedral de Braga e outros estudos de arte minhota*, Braga, APPACDM, 2004, pp.14-16.

[64] BELLINO, Albano, *Archeologia Christã*, Empreza da História de Portugal, Lisboa, 1900, pp.71-72.

[65] BARREIROS, Manuel de Aguiar, *A Catedral de Santa Maria de Braga: estudos criticos archeologico-artísticos*, Marques Abreu, Porto, 1922, pp.35-36.

[66] ATANÁZIO, M. C. Mendes, *A Arte do Manuelino, Mecenas, Influências, Espaços*, Presença, Lisboa, 1984, p.28.

1.3.2 *Église du couvent de Jésus à Setúbal*

Le chœur de l'église du couvent de Jésus à Setúbal se constitue de deux travées voûtées à nervures curvilignes au sommet. La nef est divisée en trois travées à colonnes torses et elle est recouverte par des voûtes à croisées d'ogives et par des bas-côtés en demi-berceau.

À en croire certains auteurs, en comparant la voûte du chœur du couvent de Jésus à Setúbal avec celle de Braga, on pourrait penser que Castilho a assuré la construction de la voûte de Setúbal (annexe PT-Se3).

La première pierre du couvent est bénie par l'évêque Dom Diogo Ortiz (1457-1519), évêque de Ceuta qui deviendra évêque de Viseu en 1505. En 1490, lorsque le roi Dom João II visite l'endroit, il trouve l'édifice exigu et il fait suspendre le chantier afin d'agrandir le couvent. De nouvelles fondations sont ainsi réalisées en 1500. Après la mort du roi, son successeur Dom Manuel poursuit les travaux et apporte des modifications intérieures à la demande de sa gouvernante Justa Rodrigues, fondatrice franciscaine du couvent. La grande modification fut le voûtement de la nef, qu'on avait d'abord prévu de construire en bois.[67] Les fondations auraient eu douze paumes d'épaisseur.[68]

Le tracé de l'église de Jésus est habituellement attribué à Boitaca[69], selon le *Tratado da antiga e curiosa edificação do convento de Jesus, de Setúbal* écrit en 1630 par Soror Leonor de São João, lequel cite souvent -et sans équivoque- Boitaca comme étant l'auteur du tracé du couvent.[70] Reinaldo dos Santos cite un document de la Chancellerie daté du 26 mars 1498 qui concède à Boitaca, maître tailleur de pierre *(mestre de pedraria)*, une rente d'état annuelle de 8.000 réaux en récompense des services qu'il a rendus, de son office et «ainsi que l'ouvrage du monastère de Jésus de Setúbal dont la construction a été ordonnée par Justa Roiz, ma gouvernante ».[71]

Pedro Dias a contesté l'attribution de l'ouvrage à Boitaca, laquelle

[67] VIEIRA DA SILVA, José Custódio, *A Igreja de Jesus de Setúbal,* Salpa, Setúbal, 1987, p.35.

[68] LEAL, Augusto Soares d'Azevedo Barbosa de Pinho, *Portugal Antigo e Moderno: Diccionário Geographico, Estatístico, Chorographico, Heraldico, archeologico…*, Mattos Moreira, Lisboa, Vol. 9, 1890, p.243.

[69] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, pp.221-231. L'origine de Boitaca est imprécise et variable : Italien (selon la *Crónica Serafina »*), Portugais (de la localité de Boutaca, près de Batalha où il a vécu), ou Français (origine la plus probable, car il signe *Boytac* dans les métrés des forteresses d'Afrique du nord en 1514). Son nom est mentionné pour la première fois en rapport avec le Couvent de Setúbal. En 1512, il part vivre à Batalha. São Luiz dit dans son *Memoria sobre a Batalha* que Boitaca y travaille en 1512, 1514 et 1519, bien que son nom ne figure pas dans les documents. En 1510 et 1511, il visite plusieurs chantiers de la région de Coimbra avec maître Matheus et il dirige les travaux des abattoirs, selon des lettres du roi. Il aurait travaillé à Santa Cruz de Coimbra, comme l'indique un document de 1508. À Belém, il gagnait 100 réaux par jour. En 1514 il se rend en Afrique et en 1515, il est payé pour ses services au château de Mamora. Comme d'autres architectes de son époque, il circulait entre ses différents chantiers, il a dirigé des fortifications en Afrique. Il serait mort en 1528.

[70] VIEIRA DA SILVA, José Custódio, *A Igreja de Jesus de Setúbal,* Salpa, Setúbal, 1987, pp.20-22.

[71] SANTOS, Reynaldo, *O Estilo Manuelino*, Lisboa,1952, p.21.

provient selon lui d'erreurs relevées dans la chronique de Frei Jerónimo de Belém. Il qualifie la nef d'« archaïsante et mal construite », malgré la conception spatiale d'église-halle, mais en ce qui concerne le chœur, il suggère que l'original aurait été détruit pour faire place à l'actuel. Il dit que celui-ci est un exemple typique de construction biscaïenne introduite au Portugal à la fin du 15ème siècle, notamment par les frères Castilho. Il distingue différentes phases dans la construction de l'église. Phase 1 (15ème sc.) : construction des seuls murs latéraux du bâtiment, trop fragiles pour soutenir une voûte – Phase 2 (première décennie de 1500) : démolition du chœur, qui est remplacé par le chœur actuel – Phase 3 : renforcement des murs et construction des piliers, conséquence de la décision de voûter, bien que la disposition des murs ne soit pas concordante avec l'implantation des piliers et avec la structure de la voûte.[72]

José Custódio Vieira da Silva affirme que Pedro Dias ignore le manuscrit de Soror Leonor de São João sur lequel il se base pour attribuer l'ouvrage à Boitaca. Vieira da Silva le cite partiellement : «Il était venu des Italies aux œuvres du Roy Dom Joao grâce à la réputation de son talent», et le monarque avait exigé de lui que l'église de Setúbal soit «en pierre de taille très somptueuse, et dans la forme qu'il avait tracée et elle est ainsi». C'est encore le roi Dom João II qui «l'après-midi a marché avec la fondatrice et Maître Boutaca en mesurant de combien de pieds devrait être l'enceinte du monastère en largeur et de combien en longueur». Son successeur Dom Manuel fit appeler maître Boitaca en lui ordonnant de construire une église à trois nefs couverte d'une voûte : « le Maître répondit qu'il en sera ainsi et qu'il l'avait ainsi dessinée car on lui avait montré dans des rêves dans les Italies». La dernière référence concerne l'année 1500 : « Maître Boutaca suivant les travaux du Convent conformément au dessin dont il avait rêvé en Italie, (et) comme il y avait déjà des religieuses, elles disposaient les travaux à leur goût».[73]

Cependant, Vieira da Silva reconnaît une certaine originalité à la voûte du chœur de Setúbal, sur laquelle il élabore une analyse architecturale des nervures courbes qu'il considère être les premières à avoir été réalisées au Portugal, et non à Braga, mais que les deux sont bien distinctes, puisque dans ce cas les nervures courbes ne sont pas des *combados*. Nous citons ici son analyse de l'architecture, qui reste pertinente quoiqu'inexacte quant à la définition des *combados*, que nous aborderons plus loin : « Les *combados* sont des nervures courbes, disposées surtout au centre d'une voûte, qui unissent les clefs et qui forment un cercle dans cette zone ; elles jouent un rôle équivalent à celui d'une grande clef, ce qui permet d'obtenir une voûte presque totalement plane. Ce n'est toutefois pas le cas des nervures de la voûte du chœur de l'église de Jésus de Setúbal : non seulement celles-ci n'occupent pas le centre mais elles ne relient pas

[72] DIAS, Pedro, 'A igreja do convento de Jesus de Setúbal na evolução da arquitectura manuelina', in Sep. *Belas Artes*, 1978, pp.63-72.

[73] VIEIRA DA SILVA, José Custódio, *A Igreja de Jesus de Setúbal,* Salpa, Setúbal, 1987, pp.20-22. Vieira da Silva cite la chronique de Soror Leonor de São João. *Tratado da antiga e curiosa fundação do Convento de Jesus de Setúbal. Setúbal*, de 1630. mss. Biblioteca Nacional de Lisboa, cod. 7686 et 549.

non plus les clefs entre elles. Elles présentent en outre une figure irrégulière, ce qui n'est normalement pas le cas des voûtes à *combados*, dont le dessin est parfaitement symétrique. Il suffit d'ailleurs de regarder la voûte du chœur de l'église matrice de Caminha - qui ressemble encore plus à la voûte de Setúbal que celle de la cathédrale de Braga - pour comprendre parfaitement les différences qui existent dans le tracé des nervures de l'une et de l'autre. Si toutes les nervures courbes étaient des *combados*, comment pourrait-on expliquer celles aux lignes magnifiques qu'on voit dans le chœur de l'église Nossa Senhora do Pópulo à Caldas da Rainha, laquelle fut indubitablement achevée en 1500 ». Les dates de construction sont environ 1490-1500 pour l'ensemble du couvent et 1491 à 1496 pour l'église. [74]

Cet auteur note les différentes formes de ces deux voûtes et il attire l'attention sur la voûte de Caminha, qui est similaire à celle de Setúbal. En effet, à Braga, les *combados* (nervures courbes en plan, entre les clefs) ont une forme circulaire en plan et l'effet de clef remarqué par Vieira da Silva est pertinent. Mais à Setúbal, on trouve également des *combados*, qui sont des nervures curvilignes en plan disposées au sommet de la voûte. Il n'existe pas de grandes différences entre les nervures des chœurs de la cathédrale de Braga et de l'église du Jesús de Setúbal. Par contre, on trouve des différences entre ces deux derniers types de nervures et les nervures du chœur de Nossa Senhora do Populo à Caldas da Rainha, qui sont courbes dès le tas de charge et non entre les clefs comme les *combados*.

Mendes Atanázio cite également l'église de Caminha pour laquelle il suggère une influence de Castilho. Pour le chœur de Setúbal, il l'attribue à Castilho, en comparant son style architectural à celui de Braga. Il note la planimétrie similaire de ces deux voûtes, le même plan rectangulaire et l'abside à trois faces, munie de trompes aux angles, et dont les contreforts extérieurs sont alignés avec les diagonales.[75]

Des fouilles archéologiques ont permis de dissiper quelques incertitudes sur les phases de construction de l'église de Setúbal. Le rapport de fouilles rédigé par Carlos Tavares da Silva indique que les fondations du chœur et du corps de l'église (y compris celles des contreforts) sont de la même époque -une première phase- alors que le portail de l'église et le contrefort du mur de division de la tribune sont légèrement postérieurs, constituant une seconde phase très proche de la première. Tavares considère que les données confirment l'hypothèse avancée par Vieira da Silva et s'éloignent de celle de Pedro Dias. [76]

Cependant, nous sommes d'avis que cette division en phases

[74] VIEIRA DA SILVA, José Custódio, *A Igreja de Jesus de Setúbal*, Salpa, Setúbal, 1987, p.31.

[75] ATANÁZIO, M. C. Mendes, 'Contributo de João de Castilho para o espaço e estrutura da arquitectura do manuelino, As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos descobrimentos', in, *II Simpósio Luso-Espanhol de História da Arte*, Ed. Minerva, Coimbra, 1987, p. 260.

[76] BAPTISTA PEREIRA, Fernando António; SILVA, Carlos Tavares da, *Convento de Jesus, 500 anos de Arqueologia e História*, Câmara Municipal de Setúbal, Setúbal, 1989, p.23.

n'invalide pas l'hypothèse d'une attribution à Castilho, puisque beaucoup d'autres cas confirment que les voûtes peuvent être modifiées même bien après avoir été construites. On notera le commentaire émis par Atanázio concernant la localisation insolite de la porte sud, face à une des colonnes torsadées de la nef[77]. Les fouilles ont confirmé que la porte et le contrefort du chœur sont de construction plus tardive et il est donc fort possible que la voûte ne soit pas contemporaine aux murs. Nous notons que la voûte des bas-côtés est un demi-berceau, forme qui n'exige pas un placement rigoureux des contreforts vu que la distribution des charges est uniforme le long des murs porteurs.

En ce qui concerne la nef, Mário Chicó note le peu de différence de hauteur entre la nef centrale et les nefs latérales, caractéristique des églises portugaises des ordres mendiants et il suggère que cette typologie pourra avoir incité « les bâtisseurs gothiques à adopter le type *Hallenkirchen,* dans lequel les trois nefs sont plus ou moins de la même hauteur, plus rapidement que dans les autres pays d'Europe».[78] L'église de Jésus de Setúbal est considérée comme la première *hallenkirche* au Portugal (*igreja-salão* en portugais).[79]

1.3.3 *Église São Salvador du monastère de Vilar de Frades*

L'église du monastère de Vilar de Frades (annexe PT-Br1), est une « des plus grandes églises manuélines à nef unique»[80]. Elle fut construite à l'emplacement d'un monastère plus ancien rétabli en 1425 par le roi Dom João I. [81]

Le Père Manuel de Aguiar Barreiros a attribué le chœur de l'église São Salvador de Vilar de Frades à João de Castilho en le comparant avec la voûte de la cathédrale de Braga et aussi parce que l'ouvrage était parrainé par l'évêque de Braga, Dom Diogo de Sousa. Il cite la publication du Père Francisco de Santa Maria *O Céu aberto na Terra* pour rappeler que des fonds avaient été donnés par l'évêque pour construire l'édifice, et notamment le chœur. « Aucune hésitation n'est possible : cette voûte est manuéline ; et elle ressemble et présente tellement d'affinités avec celle de Dom Diogo de Sousa, dans le chœur de la cathédrale de Braga, que nous pourrions dire que ce sont les mêmes tailleurs de pierre et le même

[77] ATANÁZIO, M. C. Mendes, *A Arte do Manuelino, Mecenas, Influências, Espaços*, Presença, Lisboa, 1984, p.28.
[78] CHICÓ, Mário Tavares, *A Arquitectura Gótica em Portugal*, Livros Horizonte, Lisboa, 2005, p.155.

[79] COELHO, Maria da Conceição Pires, 'Contributo de João de Castilho para a génese da arquitectura do Renascimento em Portugal', in *As relações artísticas entre Portugal e Espanha*, Livraria Minerva, Coimbra, 1987, p. 369. L'auteur fait référence à Reynaldo dos Santos, SANTOS, Reynaldo dos, *Oito séculos de Arte Portuguesa: História e Espírito*, Vol. II, Lisboa, Empresa Nacional de Publicidade, 1970, p.127.
[80] CHICÓ, Mário, *A arquitectura do Manuelino,* p.167.
[81] www.monumentos.pt

architecte. (…) On présumera en effet que les Biscaïens qui ont été appelés par lui pour les travaux de sa cathédrale étaient également ceux qui ont été chargés des travaux de Villar ». Outre le fait historique de la construction, l'auteur sonne l'alerte quant à l'état de conservation de l'église et du chœur, dont la voûte aurait une large « fente dans le sens de la longueur qui va jusqu'à la croisée de l'église ». [82]

La voûte du chœur a subi de grands travaux de restauration, dont une reconstruction quasiment intégrale de la voûte.

Pedro Dias émet la possibilité d'une intervention de João de Castilho dans les travaux de l'église : « Le portail attire d'emblée l'attention parce que, curieusement, il est constitué d'une partie à l'aspect traditionnel, avec quatre colonnettes et un arc surbaissé inscrit dans un alfiz, et de deux imposants troncs d'arbres taillés (en pierre, Nda) qui flanquent l'ensemble. Il semble que deux courants aient été associés : celui du plateresque espagnol et de notre manuélin plus exubérant, ce qui, de manière presque insensible, nous fait penser à João de Castilho ». [83]

Atanázio suggère que Castilho était à Vilar, peut-être avant 1509, où les armoiries de Dom Diogo de Sousa sont représentées sur la voûte, tout comme à Braga d'ailleurs.[84]

Outre le financement des travaux de l'église par l'archevêque de Braga (1505-1532), deux de ses parentes, Dona Leonor de Lemos et Dona Teresa de Mendonça, auraient également parrainé les bras du transept et les deux chapelles latérales. Vinhas indique que l'édifice du 16ème siècle se trouvait en ruine en 1620 et qu'il aurait été remplacé par la construction actuelle, plus vaste, sans toutefois préciser quelles parties auraient été modifiées. [85]

Quant à l'attribution à João de Castilho, Vinhas soumet un manuscrit de 1658 qui suscite des doutes puisqu'il y est dit qu'on doit le projet au maître tailleur de pierre João Lopes de Guimarães. Dom Diogo de Sousa y est mentionné comme ayant financé le chœur et la croisée, et peut-être même l'intégralité du projet. Il a passé la commande de « toute la machine de tout l'édifice en commençant par le chœur ». Cet auteur émet cependant des doutes quant à l'attribution du projet au maître tailleur de pierre de Guimarães, dont les œuvres ne font pas preuve d'une grande érudition et n'auraient pas impressionné outre mesure l'archevêque de Braga ni le recteur de Vilar, lesquels ne l'auraient choisi qu'au titre d'exécutant. Il cite également Matos Reis, selon qui João Lopes-o-Velho aurait commencé sa carrière

[82] BARREIROS, Padre Manuel de Aguiar, *A Egreja de Villar de Frades no concelho de Barcelos*, s.n., Porto, 1919, pp.4-7.
[83] DIAS, Pedro, 'O Manuelino', in *História da Arte em Portugal*, Vol. 5, Publicações Alfa, Lisboa, 1986, p.69.
[84] ATANÁZIO, M. C. Mendes, 'Contributo de João de Castilho para o espaço e estrutura da arquitectura do manuelino, As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos descobrimentos', in, *II Simpósio Luso-Espanhol de História da Arte*, Ed. Minerva, Coimbra, 1987, p.259.
[85] VINHAS, Joaquim Alves, *A Igreja e o Convento de Vilar de Frades: das origens da Congregação dos Cónegos Seculares de São João Evangelista (Lóios) à extinção do convento, 1425-1834*, Barcelos, MC e IPPAR, 1998, pp.85-88.

comme aide des maîtres biscaïens après les travaux de l'église de Caminha[86]. « (…) nous sommes convaincus que l'auteur du projet de l'église de Vilar a pu être le fameux architecte João de Castilho. Le projet pourrait dater de la fin de la première décennie du 16ème siècle, à un moment où Castilho achevait les travaux du chevet de la cathédrale de Braga en 1509 et où il se préparait à aller travailler sur l'église São João Baptista de Vila do Conde, en 1511, le projet de l'église São Salvador de Vilar de Frades ayant pu être conçu entre ces deux dates». [87]

Quant à la séquence des travaux de Vilar de Frades, Joaquim Vinhas distingue deux phases principales : le chœur d'abord et la croisée et les chapelles latérales ; seconde phase dans le corps de l'église (nef et chapelles latérales), lorsque les travaux ne furent plus financés par Dom Diogo de Sousa quant celui-ci s'aperçut que, sur le frontispice du chœur, dans lequel il devait être inhumé, le recteur avait fait sculpter un aigle au lieu de ses armoiries.[88]

[86] VINHAS, Joaquim Alves, *A Igreja e o Convento de Vilar de Frades: das origens da Congregação dos Cónegos Seculares de São João Evangelista (Lóios) à extinção do convento, 1425-1834*, Barcelos, MC e IPPAR, 1998, pp.151-155. João Lopes-o-Velho travailla aux chantiers suivants : cathédrale de Lamego, couvent São Bento da Avé-Maria, fontaine de la place Largo de S. Domingos à Porto, pilori d'Arcos de Valdevez, fontaines de Caminha et de Viana do Castelo, travaux de la cathédrale de Porto.

[87] VINHAS, Joaquim Alves, *A Igreja e o Convento de Vilar de Frades: das origens da Congregação dos Cónegos Seculares de São João Evangelista (Lóios) à extinção do convento, 1425-1834*, Barcelos, MC e IPPAR, 1998, pp.90-92.

[88] VINHAS, Joaquim Alves, *A Igreja e o Convento de Vilar de Frades: das origens da Congregação dos Cónegos Seculares de São João Evangelista (Lóios) à extinção do convento, 1425-1834*, Barcelos, MC e IPPAR, 1998, pp.93-100.

Outre les sources documentaires, cet auteur soutient également une attribution à João de Castilho en analysant et en comparant l'architecture du chœur et des chapelles collatérales avec celle de la nef et du transept de l'église de Jerónimos.

En 1623-1641, la construction de l'église reprend : « reprise de la construction du corps de l'église en concordance avec le vocabulaire utilisé dans le chœur et dans la croisée ». La nef aurait été achevée en 1658. [89]

1.3.4 *Église São João Baptista de Vila do Conde*

Le 15 juin 1511, Castilho signe un contrat pour la construction des nefs, des arcs et de la porte principale de l'église matrice São João Baptista, à Vila do Conde (annexe PT-Px4), qui relevait du diocèse de Braga. Aucune référence ne permet d'attribuer les voûtes du chœur, des absidioles ou les deux voûtes des bras du transept. Comme pour d'autres cas, la voûte du chœur lui est parfois attribuée par analogie architecturale.

Il s'agit de voûtes en étoile à quatre branches. Les voûtes du chœur et des chapelles latérales ont des nervures curvilignes au sommet, en forme de fleurs et de cercles.

Depuis 1496 ou 1497 travaillaient dans l'église les tailleurs de pierre Rui Garcia, João, fils de João Garcia, André de la Cota et João de

[89] www.monumentos.pt

Quintanilha, originaires de Penagós dans l'évêché de Burgos. João de Rianho fut le premier maître d'œuvre. Le 28 mai 1500, il donna procuration à Sancho Garcia pour finir l'église « selon la façon à laquelle je suis obligée envers ladite ville ». En 1507, l'église n'était pas achevée, puisque, selon une attestation de Gonçalo Anes, maître tailleur de pierre de Vila Real, le chœur était édifié (commandé par l'abbesse de Santa Clara, sa patronne) mais les chapelles de l'abside et la porte principale devaient encore être achevée. En 1509, les travaux étaient dirigés par un autre maître, Rui Garcia, encore un Biscaïen, qui réalisa les murs extérieurs «du côté du vent» et la porte latérale nord. En 1511, il existe un désaccord avec lui sur le prix à payer pour les arcs de la nef et, à cette occasion, on fait appel à Braga à « un ouvrier du chantier de l'église ». En juin 1513, les autorités de la ville disposaient : « que Castilho fasse les fondations dans l'escalier en colimaçon, autant qu'il sera nécessaire pour la tour, et ensuite on verra ce qu'ils doivent lui payer, en plus de ce qu'il est tenu de faire ». Le 2 juillet de cette année est conclu un nouvel « accord sur l'église », dans lequel João de Castilho s'engage à achever, « en plus ou moins un mois », avant Carnaval, tous les travaux auxquels il était tenu par les contrats, à savoir les arcs, nefs et le portail principal de l'église. Les dernières mentions de João Castilho à Vila do Conde datent du 29 de août et du 5 septembre 1513, quand la ville fait vider des maisons à donner « à Castilho vu qu'il se plaint qu'il a beaucoup d'ouvriers et qu'il n'a nul abri à leur donner ». Aidé de plus de vingt artistes, Castilho élève les nefs, les arcs de l'église et le portail principal. [90]

On notera les deux dates distinctes citées pour la construction du portail, qui est comparé au grand portail de la *Catedral Nova* de Salamanque[91] (annexe ES3). En 1507, la construction de la porte était commencée et Castilho était à nouveau engagé en 1511 pour la construction de ce même portail.

On pourra penser la même chose du chevet, considérée achevé en 1507, raison pour laquelle la plupart des auteurs ne l'attribuent pas à Castilho. [92] Pedro Dias suggère cependant que le chevet a été remplacé par un autre de plus grande taille, puisqu'on sait que le roi Dom Manuel a fait modifier le projet en 1502 lorsqu'il y est passé en allant à Saint Jacques de Compostelle. Cet auteur considère que le chevet et les chapelles latérales présentent un même style « castilhien » et il ne doute pas que Castilho soit l'auteur de ces

[90] FREITAS, Eugenio de Andrade da Cunha, 'João de Castilho e a sua obra no além Douro', in *Colóquio,* Nº 15, Lisboa, 1961, pp.6-7. L'auteur s'appuie sur des preuves documentaires, comme les *Matrículas de Ordens do Arcebispo de Braga,* de 1505, qui contiennent différentes informations concernant la construction de l'église de Vila do Conde et, plus généralement, l'intervention des Biscaïens au nord du Portugal, et sur le contrat signé par les autorités de la ville, document jusqu'alors inédit.

[91] COELHO, Maria da Conceição Pires, 'Contributo de João de Castilho para a génese da arquitectura do Renascimento em Portugal', in *As relações artísticas entre Portugal e Espanha,* Livraria Minerva, Coimbra, 1987, p. 347.

[92] FREITAS, Eugenio de Andrade da Cunha, 'João de Castilho e a sua obra no além Douro', in *Colóquio,* Nº 15, Lisboa, 1961, p.7 ; GIL, Júlio, *As mais belas igrejas de Portugal*, Vol.I, 1989, p.66.

voûtes.[93]

Neves commente et donne une liste des altérations du projet initial, qu'il attribue à João de Castilho, « la tour ne fut pas faite où elle avait été projetée, le portique du chœur ne fut pas ouvert vers la sacristie et on construisit deux chapelles latérales à la [chapelle] centrale, en rendant l'ensemble plus harmonieux. Postérieurement, on érigea les deux très belles chapelles qui ferment le transept, celle de l'épître [à droite du chœur], de Nossa Senhora da Boa Viagem, et celle de l'évangile [à gauche], de São Miguel-o-Anjo renommée plus tard de Nossa Senhora da Assunção ». Nous donnons la transcription de la lettre du roi, qui rend compte de ce qu'aurait été le projet initial et de l'intervention directe du roi pour déterminer les grandes lignes de la construction. « L'église sera édifiée sur le champ et lieu de S. Sebastião, et elle comportera trois nefs, d'une longueur de douze brasses [1 brasse=2,20m], depuis la chapelle [le chœur], et d'une largeur de huit, dont une largeur de huit coudées [1 coudée=0,66m] pour la nef centrale, et le reste pour les autres nefs. La chapelle sera voûtée, de la largeur de la nef centrale, et aussi large que longue, aux frais de l'Abbesse, et avec un parement de pierre, et sur la pointe de l'arc de la chapelle un miroir rond pour donner de la lumière, et contre la chapelle une sacristie avec une porte d'accès. La porte principale sera en face de plusieurs maisons qui seront abattues ; et sur la porte du dehors on fera une tour de la hauteur du pignon de l'église formé sur trois arcs qui soient de la hauteur de l'arc de la porte, allant flanquer les deux des côtés sur le mur de l'église en face des arcs de la nef (…) ». Les travaux de Vila do Conde avancèrent lentement lorsqu'ils étaient financés par la population mais ils progressèrent substantiellement lorsque le roi Dom Manuel y engagea un apport de trente mille réaux.[94]

À ces observations, nous pouvons ajouter que le projet initial du chevet avait un plan carré, qui diffère du plan actuel qui est plus profond que large.

1.3.5 *Cathédrale de Viseu*

Il n'existe aucun document concernant l'attribution de la cathédrale de Viseu (annexe PT-Vi1).

On attribue généralement à Castilho la voûte du narthex qui est extrêmement surbaissée à arcs transversaux en anse de panier.

Viterbo considère cette voûte comme la première œuvre portugaise de Castilho, qui fut aidé par son frère Diogo de Castilho. Les deux voûtes, narthex et nef, étaient terminées en 1513 d'après une inscription : « Cette cathédrale a été ordonnée de construire par le très magnifique Seigneur Dom Diogo Ortis évêque de cette ville de

[93] DIAS, Pedro, 'João de Castilho e o desenvolvimento da arquitectura manuelina', in *História da Arte em Portugal*, Publicações Alfa, Lisboa, 1986, pp. 57-58.

[94] NEVES, Joaquim Pacheco, *Vila do Conde*, Secção Cultural de Vila do Conde, 1991, pp.53-56.

Concelho dos Reis et elle a été terminée en l'an de grâce 1513».[95]

Barreira lui attribue la voûte en croisée d'ogives de la nef, la voûte dite « des nœuds ».[96]

Virgílio Correia a voulu retrouver des documents sur l'auteur de voûtes « des nœuds » de la nef de Viseu, et il rapporte que des documents de la ville de Braga, *Acordãos de Vereação bragueza*, font mention d'un Castilho en 1515, pour un marché de construction ou de remaniement du pont de Guimarães. Le prénom n'est cependant pas indiqué.[97]

Coelho remarque que Viterbo ne fait pas référence à la voûte de la nef, dont on ne connaît pas l'auteur, et il commente que Castilho aurait pu entrer au Portugal par Viseu, vu que Castilho et l'évêque se connaissaient probablement, ce dernier étant originaire de Calçadilha, localité située prés de Salamanque. L'évêque était très influent et il a exercé des fonctions importantes à la cour des rois Dom João II et Dom Manuel I. Il a appartenu au groupe de mathématicien (*Junta dos Matemáticos*) de Dom João II, il fut cosmographe, astrologue, grammairien, lettré et théologien. Il souligne également les relations ecclésiastiques avec Dom Diogo de Sousa, évêque de Braga, desquelles auront ensuite découlé des rapports avec João de Castilho. [98]

Nous ajoutons à ce commentaire que ce fut l'évêque Diogo Ortiz qui a béni la première pierre de la construction du couvent de Jésus de Setúbal, comme nous l'indiquions précédemment. La prise de contact avec Castilho aura donc pu se faire à Salamanque, ou à Setúbal, d'où il aurait continué vers Viseu.

1.3.6 *Église São Miguel de Freixo de Espada-à-Cinta*

Les églises-halles de Freixo de Espada-à-Cinta (annexe PT-Bg1), et d'Arronches ont été attribuées à João de Castilho en comparant leur architecture à celle de l'église de Jerónimos à Lisbonne. En effet, on n'a trouvé aucune preuve documentaire concernant l'auteur ou la date de construction des voûtes. On sait cependant qu'il s'y est marié en 1513.

Mário Chicó a été le premier à souligner la similitude entre ces trois églises, qui sont dotées d'une unique voûte couvrant les trois nefs. Il les classe comme des églises-halles de type manuélin, même s'il note que l'église de Freixo conserve encore des arcs séparant les nefs, contrairement aux deux autres qui sont déjà totalement

[95] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Lisboa, Imprensa Nacional, Vol.I, 1899, p. 183.
[96] BARREIRA, João, "O goticismo de João de Castilho", in Sep. da *Revista da Faculdade de Letras*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1933, p.205.
[97] CORREIA, Vergílio, *As Obras de Santa Maria de Belém de 1514 a 1519*, Tip. do Anuário Comercial, Lisboa, 1922, p.16.
[98] COELHO, Maria da Conceição Pires, 'Contributo de João de Castilho para a génese da arquitectura do Renascimento em Portugal', in *As relações artísticas entre Portugal e Espanha,* Livraria Minerva, Coimbra, 1987, pp. 348-349.

débarrassées de ces éléments.[99]

Mendes Atanázio partage cette idée et ajoute : « La nouveauté et l'intérêt sont ici les nervures-arcs qui naissent aux murs et qui passent par le centre du voûtement de chaque travée, de manière à faciliter la lecture d'une voûte unique traversant les trois nefs sensiblement à la même hauteur. Une autre preuve de la tentative consciente de fuir à la planimétrie de Belém et d'Arronches, pour expérimenter d'autres structures logiques tendant à réaliser l'unité de l'espace architectural ». [100]

La construction de l'église de Freixo fut longue, et elle fut même interrompue à plusieurs reprises car l'avancement du chantier, qui avait commencé au 14ème siècle, dépendait des rentes provenant des habitants de la région. Même le règne de Dom Manuel, au cours duquel les travaux s'intensifièrent, ne permit pas d'achever le chantier, qui se poursuivit encore un certain temps après la mort du roi.

Francisco Pintado, dans son analyse des détails constructifs, suggère qu'au début du 16ème siècle, les murs de l'église de Freixo étaient de moitié moins grand que ceux d'aujourd'hui. Il observe la décoration des consoles et il note que l'absidiole nord et sud, ainsi que la sacristie sont des constructions accouplées car il n'existe aucune continuité de leurs murs avec le chœur. La corniche est en outre différente. Le long des murs nord et de l'absidiole sud, il observe que les murs ont été interrompus et ensuite repris à la base des petites fenêtres et reculés de 0,25m. De ces observations, il en déduit que la construction des voûtes ne date que du temps du roi Dom João IV. Bien que les phases de la construction qu'il indique soient claires, les preuves ne nous paraissent suffisantes pour une datation.[101]

1.3.7 *Église Nossa Senhora da Assunção d'Arronches*

L'église actuelle du début du 16ème siècle a été construite sur un édifice primitif (1236-1242). « On remarque encore de maigres vestiges sur lesquels le temple a probablement été édifié, même si la tradition veut que la première église se situait plus à gauche de l'actuelle. Il semble certain que la tour a été édifiée sur les fondations de celle qui desservait peut-être le temple construit au 13ème siècle».[102]

L'église matrice d'Arronches (annexe PT-Pg2) appartient à la trilogie des églises (avec Santa Maria de Belém et Freixo de Espada-à-Cinta) qui possèdent une voûte unique couvrant les nefs, comme

[99] CHICÓ, Mário Tavares, *A Arquitectura Gótica em Portugal*. Livros Horizonte, Lisboa, 2005, p. 164.
[100] ATANÁZIO, M.C. Mendes, *A Arte do Manuelino*, Editorial Presença. Lisboa, 1984, pp. 112-113.
[101] PINTADO, Francisco António, *A Igreja Matriz de Freixo de Espada-à-Cinta - Notas para o seu estudo, Freixo de Espada-à-Cinta*, (a publicar), pp.49-52.
[102] KEIL, Luís, *Inventário Artístico de Portugal - Distrito de Portalegre*, Academia Nacional de Belas Artes, Lisboa, 1943, p.11.

nous l'avons signalé plus haut.[103]

Pour cette raison, Mendes Atanázio suggère d'attribuer la voûte de la nef à Castilho : « L'église matrice d'Arronches présente une planimétrie assez semblable à celle de Belém, bien qu'elle soit plus petite et qu'elle ne possède pas les ramifications en étoile de la voûte et qu'elle ait des colonnes au lieu de piliers octogonaux ; des nervures vont d'un appui à l'autre, dans le sens transversal, et elles s'arquent également sur trois clefs, au centre des travées. Les différences du schéma structurel entre Arronches et Belém nous amènent à conclure à une conscience architectonique qui essayait de nouvelles solutions visant à réaliser l'unité spatiale, ce qui est créatif et dynamique. Vue de son extrados, la voûte d'Arronches donne l'impression d'être composée de parties de voûte successives, chacune couvrant une travée, problématique qui mérite une étude attentive ».[104]

Il n'existe cependant aucune source historique concernant l'attribution.

1.3.8 *Église matrice de Torre de Moncorvo*

L'église de Torre de Moncorvo (annexe PT-Bg4) n'a donné lieu qu'à une bibliographie réduite. Elle ne semble pas avoir été remarquée par la plupart des historiens de l'art qui se sont penchés sur le style manuélin. Cette église possède un voûtement unique qui traverse ses trois nefs et une section qu'on retrouve à Viseu, Freixo de Espada-à-Cinta, Arronches et Jerónimos.

Eugénio Cavalheiro et Nelson Rebanda constatent qu'il il est malaisé de dater la construction, faute de documents. Ils contestent la date de construction tardive suggérée, sans fondement, par certains auteurs qui la situent entre 1540 et 1556. Faisant référence à Abade de Baçal, Natália Marinho et J. Ferreira Alves, ils écrivent que « Le géographe João de Barros, vers 1549, affirme que l'église de Torre de Moncorvo a été commencée quarante ans avant son passage par cette ville, ce qui nous renvoie au début du 16ème siècle. Nous croyons qu'il n'y a pas de raison de douter de ce fait, puisque João de Barros est un témoin direct et un observateur attentif, comme le montre tout son travail de géographie. (…) Ce chorographe constate également le caractère ininterrompu de son œuvre : « et toujours assidu sur elle ». Il ajoute en outre que « elle (l'église) est à voûte », ou autrement dit, la voûte – ou une partie de la voûte - existait déjà». [105]

Les auteurs identifient João de Castilho comme l'auteur probable en se fondant sur Moreira, qui confirme la présence de l'architecte à Freixo, «grand spécialiste des voûtes ». Vu leur proximité géographique et leur contemporanéité, les similitudes structurelles entre les deux églises suggèrent qu'il existe une influence de Freixo

[103] CHICÓ, Mário Tavares, *A Arquitectura Gótica em Portugal*, Livros Horizonte, Lisboa, 2005, p. 164.
[104] ATANÁZIO, M. C. Mendes, *A Arte do Manuelino, Mecenas, Influências, Espaços*, Presença, Lisboa, 1984, p.112.
[105] REBANDA, Nelson; CAVALHEIRO, Eugénio, *A igreja matriz de Torre de Moncorvo*, Mirandela, João Azevedo, 1998, p.30.

dans la phase initiale de l'église de Torre de Moncorvo[106]. Ils en concluent que la construction de l'église aurait commencé à la fin de la première décennie du 16ème siècle pour se terminer complètement entre 1609 et 1638.

L'IRHU donne des dates de début de construction similaires (1508 – 1510) en se basant également sur le témoignage de João de Barros et indique que la voûte a gravement souffert du tremblement de terre en 1858.[107]

1.4 Ouvrages monastiques

À partir de 1515, quand le roi Don Manuel devient son commanditaire, João de Castilho a une activité tellement intense qu'il n'est plus permis de douter de sa capacité de travail. Pendant 13 ans, il partage son temps entre les quatre plus importants chantiers de l'époque. Il est le maître d'œuvre du couvent du Christ à Tomar en 1515, du monastère des Hiéronymites à Lisbonne en 1517, du monastère d'Alcobaça en 1519 et du monastère de Batalha en 1528.

[106] REBANDA, Nelson; CAVALHEIRO, Eugénio, *A igreja matriz de Torre de Moncorvo*, Mirandela, João Azevedo, 1998, p.36.
[107] www.monumentos.pt

1.4.1 *Monastère Santa Maria d'Alcobaça*

En 1519, João de Castilho dirigeait des travaux du monastère d'Alcobaça (annexe PT-Le1). Une lettre du roi Dom Manuel à Vasco de Pina, datée du 7 juillet 1519[108], recommande de suspendre quelques chantiers « …et qu'on n'en fasse pas d'autres maintenant, sinon ceux que Ioham de Castilho doit faire, la sacristie et la librairie comme l'y oblige son contrat … (…) Et quant aux deux cent mille réaux que Joham de Castilho devait avoir maintenant pour le premier paiement de son chantier, nous estimons qu'on doit lui donner cent mille réaux sans plus. Et que les autres cent mille lui soient donnés d'ici à deux mois et que dorénavant ses paiements lui soient faits ainsi et de la manière dont ils sont prévus dans son contrat. Et tous ces travaux, nous vous les commandons et ordonnons que vous les surveilliez et les observiez, de manière à ce que tous les travaux se passent bien et conformément aux exigences

[108] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, Vol.I, pp. 188-189 Lettre du roi Dom Manuel à Vasco de Pina, datée du 7 juillet 1519 : «…e que se não façam agora outras, senam as que Ioham de Castilho hade fazer, a sacristia e a livraria segundo êle por seu contrato é obrigado… (…) E quanto aos duzentos mil reais que Joham de Castilho avia daver agora da primeira paga de sua empreitada aveemos por bem que lhe sejam dados agora cem mil reis e mais nam. E os outros cem mill lhe dares dhy a dous meses, E dhy em diante lhe seram feitas suas pagas asy e na maniera que em seu contrato vão ordenadas. E todas estas obras vos encomendamos e mãdamos que vigies e olhes, porque todas as façam asi bem e como os oficiaaes que as teem por seus contratos san obrigados e naquella perfeiçam e limpeza que se deve fazer e como nos por nosso serviço confiamos que tudo se fara olhando ho vos » ANTT, mss 24, doc.101.

des contrats des travaux et de manière parfaite et propre, comme il se doit et comme nous, pour notre service, nous vous faisons confiance que vous veillerez à tout ».

Le 29 août de la même année, une autre lettre de Vasco de Pina adressée au roi Dom Manuel concernant les devis des travaux de réparation des pressoirs, qui étaient en mauvais état, mentionne que « Castylho n'est pas ici, car il est à Belém ».

La voûte de la sacristie d'Alcobaça se serait effondrée lors du grand tremblement de 1755 et il ne subsiste que celle qui couvre le passage vers l'église et qui a été construite à l'endroit d'une chapelle.

Le Père Manuel de Figueiredo disait que « les voûtes de ce grand ouvrage ressemblaient beaucoup à celles du cloître de Belém » et qu'y travaillaient João de Ruão, Nicolau de Chanterènne et Rui Garcia[109].

Il s'agit d'une voûte à liernes, formant un hexagone central. Celui-ci forme un plan surbaissé au sommet, qui recoupe le plan formé par les nervures venant des consoles, un peu à la manière de la nef de Jerónimos.

Moreira lui attribue aussi, à Alcobaça, des travaux de la cuisine au réfectoire ou au cloître, la porte de la sacristie, une voûte dans l'angle du cloître et l'étage supérieur du cloître avec des arcs en anse de panier.[110] La porte de la sacristie est considérée comme un des meilleurs exemples du style manuélin, selon Korrodi un « style maniériste exubérant caractéristique des ouvrages dont il est l'auteur»[111], ce que Moreira contredit en affirmant que le plus impressionnant de la porte est sa « stylisation et sa symétrique, loin du réalisme manuélin ».

Castilho travailla aussi sur d'autres chantiers à Alcobaça. Les derniers paiements datent de 1528.

Nous soulignons ici les informations reprises dans la correspondance entre le roi Dom Manuel et Vasco de Pina, en ce qui concerne la manière de travailler de Castilho. En juillet 1519, Castilho commençait les travaux et en août il était déjà à Belém (on se rappelle que celle année-là, il était aussi allé à Tomar). Cela signifie que Castilho n'aura fait que laisser des instructions concernant le projet en laissant à un subalterne le soin d'exécuter le chantier, avec le suivi de Vasco de Pina.

1.4.2 *Monastère Santa Maria da Vitória de Batalha*

En 1528, João de Castilho est nommé maître d'œuvre du monastère de Batalha (annexe PT-Le4)., comme on le lit dans une lettre du 4

[109] COCHERIL, Dom Maur, *Routier des Abbayes Cisterciennes du Portugal*, Paris, Fundação Calouste Gulbenkian, Centro Cultural Português, 1978, pp. 263-264.

[110] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal. A Encomenda Régia entre o Moderno e o Romano.* Thèse de doctorat en Histoire de l'Art. Lisbonne. Universidade Nova de Lisboa, 1991, p. 446.

[111] KORRODI, Ernesto, *Alcobaça: estudo histórico-archeológico e artístico da Real Abadia de Santa Maria de Alcobaça*, Litografia Nacional, Porto 1929, p.41.

juin de João III : « ayant confiance en Jº de Castyllo, maître de mes ouvrages … je le nomme dorénavant maître d'œuvre du monastère de Batalha ». Pas pour longtemps cependant, puisqu'en 1529 on le retrouve à Arzila comme contrôleur des travaux, fonction à laquelle il renonce en 1532 en faveur de Miguel de Arruda.[112]

Les preuves documentaires de l'intervention de Castilho font état de dates sans toutefois nous éclairer sur ce qu'il aurait pu construire au monastère de Batalha.

Selon Moreira, Castilho serait allé achever les chapelles imparfaites en 1528, puisque Boitaca, qui était chargé du chantier, était mort cette année-là. Castilho aurait construit les arcs-boutants de renforcement de l'abside de l'église et il aurait établi le projet d'une couverture qu'il n'a pas réussi à concrétiser, ne laissant qu'un balcon entre 2 piliers, avec des décors proto-Renaissance. Il renonce ensuite à sa mission en 1532 et les travaux furent achevés en 1533, comme l'indique une inscription sur une pierre du balcon. Moreira commente que les voûtes des chapelles imparfaites présentaient une portée trop importante à couvrir. Il en parle comme de « l'échec majeur de Castilho » qui comprit alors « l'inefficacité du système gothique ». [113]

Selon Senos, cette supposée incapacité technique de Castilho à voûter cette portée n'existe pas. Il compare les dimensions des voûtes de Batalha et conclut que, avant Castilho, maître Huguet avait voûté des portées plus grandes, tels l'octogone central de la chapelle du roi Dom Duarte, d'une portée de 25,4m, ou la salle du chapitre, dont la diagonale fait 26,5m pour un côté de 19m. Et on n'oubliera pas non plus de mentionner la lettre de quitus que Dom João III a donnée à Castilho, dans laquelle le monarque précise que l'architecte n'a pas terminé le chantier, non à cause d'une quelconque incompétence, mais sur décision du roi.[114] Et finalement, rappelons à cet égard l'imposante voûte du transept de l'église de Jerónimos, qui fait 19m sur28,5m.

Selon Pedro Dias, l'ouvrage de Batalha qui a été attribué à Castilho avec le plus de certitude est la voûte du vestibule qui sépare les chapelles imparfaites et le chevet de l'église, qu'il compare à la voûte d'Alcobaça.[115]

Cette voûte présente une trame de nervures sur différents plans qui crée un espace dépourvu de division entre les travées et uni par une hauteur constante.

Cette opinion est aussi celle de Nuno Senos, qui y ajoute également les fenêtres et les arcs-boutants. Senos émet l'hypothèse que la voûte du vestibule a été interrompue parce qu'il était prévu depuis le

[112] BARREIRA, João, "O goticismo de João de Castilho", in Sep. da *Revista da Faculdade de Letras*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1933, p.209.
[113] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal: a encomenda régia entre o moderno e o romano*, (texto policopiado), tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências Socais e Humanas, Universidade Nova, Lisboa, 1991,pp. 464-465.

[114] SENOS, Nuno, 'João de Castilho e Miguel de Arruda no Mosteiro da Batalha', in *Murphy - Revista de História e Teoria da Arquitectura*, Julho 2007, Universidade de Coimbra, p.39.
[115] DIAS, Pedro 'João de Castilho e o desenvolvimento da arquitectura manuelina', in *História da Arte em Portugal*, Publicações Alfa, Lisboa, 1986, p. 54.

départ d'ouvrir les murs pour relier la chapelle à l'église. Quand, en 1438, le roi Dom Duarte et Huguet meurent, le chantier n'avait même pas encore démarré et les murs étaient dressés jusqu'à la naissance des voûtes des absidioles. Plusieurs architectes se succédèrent sur le chantier, Mateus Fernandes jusqu'en 1509, son fils homonyme jusque 1528 et Castilho en 1528-1532. Senos souligne le caractère hybride de Castilho, qui combine les formes « modernes » et « romaines ».[116]

1.4.3 *Monastère de Jerónimos de Lisbonne*

Le monastère des Hiéronymites – Jerónimos, à Belém (annexe PT-Lx3), a été bâti à l'emplacement d'un édifice religieux déjà existant. En l'occurrence il s'agissait d'une église comportant clocher, dortoirs et réfectoire[117], que le roi Don Manuel a offert à la communauté des moines hiéronymites en 1499.

Outre ses fonctions religieuses, le bâtiment antérieur abritait des postes de contrôle et des installations desservant les activités relatives aux explorations maritimes des Grandes découvertes qui partaient du port de Restelo. Par ailleurs, l'endroit était aussi utilisé pour le chargement et le déchargement des bateaux ainsi que pour l'accueil des marins. Le long corps à l'ouest a pu être un abri destiné à servir d'entrepôt.[118]

Des étrangers arrivaient constamment au Portugal pour aider à la construction et le grand chantier était alors celui de l'église du monastère, église Santa Maria de Belém, où travaillèrent des Français, des Allemands et surtout des Espagnols.

En 1504, une foule d'ouvriers travaillaient dans ce bâtiment « qui surpassait tout autre édifice de l'époque »[119].

Ce ne fut qu'à partir de 1514 qu'il y eut des documents plus précis concernant le chantier et les travaux. Les cahiers de comptes de 1514 à 1519 intitulés *Despesa das Obras de Belém e da Câmara e Cadeia de Setubal*, sont la principale source à ce niveau, bien que ces documents ne soient pas complets.

Normalement, on divise l'évolution des travaux de cette période en deux phases : la première phase correspond à la direction de l'architecte Boitaca, à qui on attribue le plan initial. La deuxième commence en 1517 et constitue la phase de grand essor des travaux, dirigée par João de Castilho. Bien que ces attributions ne soient basées sur aucune preuve directe, voyons toutefois ce qu'en disent les documents.

En mars de 1514, des paiements sont effectués en faveur de Boitaca,

[116] SENOS, Nuno, 'João de Castilho e Miguel de Arruda no Mosteiro da Batalha', in *Murphy - Revista de História e Teoria da Arquitectura*, Julho 2007, Universidade de Coimbra, pp. 10-45.
[117] Selon le document de lecture du titre de propriété présenté par Manuel C. M. ATANÁZIO, *op. cit*., p. 80.
[118] MARQUES, Lina, 'O Claustro do Mosteiro de Santa Maria de Belém', in *Cadernos de Historia de Arte I*, Lisboa, 1991, pp. 11-15.
[119] MOREIRA, Rafael, *Jerónimos*, Lisboa, Verbo, 1991, p. 6.

de ses serviteurs et salariés, maçons et charpentiers. Celui-ci aurait été remplacé par Leonardo Vaz, le temps d'un voyage en Afrique, et revient en août pour diriger les travaux. Cette année-là, on transporte de la pierre calcaire pour les murs, du basalte pour les fondations ainsi que du bois, du sable, des tuiles, des briques ainsi que d'autres matériaux pour la « réparation dans la vieille église ».

On ne dispose d'aucun cahier de paiement pour 1515 mais en 1516 c'est encore maître Boitaca qui dirige, avec très peu d'ouvriers, peut-être parce que la plupart des travaux avaient lieu alors dans les carrières des environs, à Raposeira, Alvito, Alcantâra, Rio Seco ou Vinhas. En février et mars, des paiements sont faits pour la taille des pierres de la chapelle de la sacristie, de cinq chapelles du dortoir, un chapiteau de la chapelle du transept, des lucarnes de l'église et une cimaise, entre autres.

C'est en avril de cette même année, que le nom de João de Castilho, est mentionné pour la première fois dans un paiement pour des pierres de taille du nouveau monastère. À l'époque, il travaille encore sous la direction de Boitaca.

Au début de 1517, Castilho remplace Boitaca. La feuille du mois de mars est claire à ce sujet : « Item João de Castylho, maître d'œuvre *(mestre empreyteiro)* du cloître premier et du chapitre, sacristie et portail latéral, doit apporter cent dix ouvriers et doit recevoir par mois cent quarante mil réaux ». En tête des listes on lit *João de Castylho Mestre*[120], « maître », soit le même titre qu'on donnait en 1514 à Boitaca lorsqu'il était en tête de liste : *Mte Boytaca*. On supposera que si le titre était le même, leur mission devait aussi être la même.

On voit alors João de Castilho diriger les travaux du cloître, du chapitre, de la sacristie et du portail sud avec 110 ouvriers. Il a surtout travaillé au portail sud et supervisé les autres parties, où on retrouve alors, en tête de liste de paie, d'autres noms, également espagnols : Pero Goterres au chapitre, Rodrigo de Pontezilhas à la porte du chapitre, Fernando de la Fermosa pour la sacristie, Francisco de Benavente pour le cloître.

Les ouvriers qui accompagnaient Castilho étaient portugais, biscaïens, castillans, basques (*vascongados*), asturiens, français et flamands.[121]

Leonardo Vaz dirigeait l'équipe du réfectoire, et João Gonçalves dirigeait avec Rodrigo Afonso les trois chapelles du narthex. Deux sculpteurs dirigeaient aussi des équipes, Pero de Trilho et Nicolau de Chanterenne ; Trilho dans le cloître et Chanterenne à la porte

[120] CORREIA, Vergílio, *As Obras de Santa Maria de Belém de 1514 a 1519*, Tip. do Anuário Comercial, Lisboa, 1922, p.17. Transcription de la feuille du mois de mars 1517 « Item João de Castylho mestre empreyteiro da crasta premeyra e capytollo, sacrystia e portal da travesa ade trazer cento e dez hofycyaes e adeaver por mes cemto e corenta mil rs. ». En tête des listes « João de Castylho Mestre ». MMS 170, Arquivo Nacional da Torre do Tombo, *Despesas das Obras de Belém e da Camara e Cadeia de Setubal*.

[121] MARQUES, Lina M. Oliveira, 'O Claustro do Mosteiro de Santa Maria de Belém' in, *Cadernos de História de Arte I*, Lisboa, 1991, p.40.

principale. Pero de Trilho était espagnol et il a travaillé à la cathédrale de Séville en même temps que Castilho.

Pendant l'année 1517, de la pierre est amenée en grande quantité de pour la construction. Elle provient des carrières de Celas, Ajuda, Laveiras, Paradela et Oeiras. Les briques et les tuiles sont amenées de Lisbonne et le bois vient de l'île de Madère.

En 1518, il existe une liste pour le mois de janvier. Castilho est toujours tête de liste ; en troisième position, on trouve un Gonçalo de Castilho et, vers la fin, Diogo de Castilho, son frère qui l'a souvent accompagné et qui vivra plus tard à Coimbra, où on lui doit d'ailleurs plusieurs ouvrages. Il est intéressant de voir que João de Castilho y est mentionné «…João de Castylho entrepreneur du portail latéral et du premier cloître et du chapitre et de la sacristie doit apporter cent huit ouvriers et aura par mois cent quarante mil réaux ».[122] Virgilio Correia indique que 146 ouvriers travaillent avec lui, et non 108. Mais nous voulons souligner le fait que Castilho cette fois-ci n'est pas appelé « maître d'œuvre » mais seulement d' « entrepreneur » et il n'y a pas de « sous-entrepreneurs » (sous-traitant) en tête de liste. Ceci indiquerait qu'il a fait les travaux lui-même, non pas comme architecte/maître dirigeant plusieurs équipes, mais comme entrepreneur, qui travaille sur le chantier. Il est toutefois curieux de noter que son traitement reste le même, ce qui tendrait à indiquer que la responsabilité était aussi la même.

[122] SÁ, Maria Ealo de, *El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos*, vol. II, Merindad de Trasmiera 1992, p.23.

On trouve finalement quelques informations sur l'église dans les derniers feuillets du cahier daté de décembre 1518 et janvier 1519. À la fin de 1518, João de Castilho n'est plus mentionné dans les feuilles de paiement mais, en décembre, on retrouve la liste des « ouvriers de João de Castilho »[123], ce qui sous-entend que les travaux étaient encore dirigés par lui. Pontezylhas était en tête de liste pour la taille des piliers de l'église, Guilherme pour le cloître et Fernando de la Fermosa pour le réfectoire et le cloître.

Entre le 13 décembre et le 15 janvier 1519, Benavente était appareilleur des piliers avec 30 ouvriers, pour la plupart espagnols et français. Pontezilhas appareillait l'église avec 46 étrangers et Fernando de la Fermosa travaillait sur le cloître.

En août 1519, seul Pontezilhas figurait encore en tête de liste, avec beaucoup moins d'ouvriers.

Un reçu de cette année décrit l'avancement du cloître : le cloître inférieur était achevé et au cloître supérieur (premier étage), il manquait encore deux travées. Vergílio Correia nous informe que les travaux étaient peut-être à l'arrêt par manque d'argent, puisque seuls Pontezilhas et quelques autres artistes y œuvraient, quelques autres s'étant rendus de Séville pour travailler à la cathédrale. [124]

Avant sa mort en 1521, le roi Dom Manuel donne des maisons annexes à João de Castilho, ce qui suggère une activité exigeant la

[123] CORREIA, Vergílio, *As Obras de Santa Maria de Belém de 1514 a 1519*, Tip. do Anuário Comercial, Lisboa, 1922, p.32.
[124] CORREIA, Vergílio, *As Obras de Santa Maria de Belém de 1514 a 1519*, Tip. do Anuário Comercial, Lisboa, 1922, p.35.

présence permanente de l'architecte. Quand le roi meurt, l'église est toujours en chantier.

En septembre 1522, le roi João III charge João de Castilho de faire les piliers et la voûte du transept, comme en témoigne cet ordre de paiement : *«* Nous commandons par notre décret à Pero Llopes qu'il remette à João de Castilho, maître des travaux de Bellem, mil cruzados en paiement partiel de l'entreprise, qui est à présent refaite avec lui pour la réalisation des voûtes et des piliers de la croisée de l'église de Bellem, lesquels il doit lui remettre aux échéances correctes qui y sont prévues, ce pour quoi nous vous commandons de remettre lesdits mil cruzados au dit Pero Lopez aux échéances figurant dans ledit décret, que nous lui émettons ainsi pour lui et par celui-ci avec votre connaissance formelle nous ordonnons qu'ils vous soient portés en compte ». [125]

On ne dispose pas d'autres informations relatives aux travaux à l'époque de Castilho. Seuls les chroniqueurs évoqueront encore le transept en disant que les voûtes se sont écroulées la première fois qu'on les a décintrées.

Il ne fait pas de doute que les documents avancés par les partisans de Boitaca prouvent que la quasi-totalité du monastère fut exécutée sous la direction de Castilho. Cependant, certains auteurs, qui se fondent sur des documents postérieurs ou sur des analyses architecturales pas toujours correctes, attribuent à Boitaca le projet, que Castilho n'aurait fait qu'exécuter. Nous ne disposons hélas sur l'œuvre de Boitaca que de peu d'informations susceptibles d'éclairer ce point.

Vergílio Correia ne prend pas parti dans l'attribution du projet et il constate seulement que les dossiers des travaux ne sont pas clairs sur ce point. Il conclut que, sous la direction de Boitaca, entre 1514 et 1516, les murs périphériques de l'église furent construits, on tailla en effet les fenêtres et les cimaises, et concernant la direction de Castilho : « Il manquait les voûtes et les garnitures intérieures et extérieures, tâche qui revint à Castilho. À Castilho échurent également les travaux du cloître, de la maison du chapitre et de la sacristie, et peut-être seules les fondations avaient été lancées quand il prit les travaux en charge. Il est certain qu'en 1517, 1518 et 1519, on termina la porte principale et latérale et la sacristie ; on avança grandement l'ouvrage des piliers destinés à soutenir la voûte ; on tailla et posa les pierres de taille du cloître inférieur et de deux portées des arcs du cloître supérieur ; et le réfectoire fut conclu ».[126]

[125] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, 3 Vols., Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, Vol. I, p.190. Transcription de l'ordre de paiement : «Nos mandamos ora per noso desembarguo a Pero Llopes que entregue a João de Castilho, mestre das obras de Bellem, mil cruzados em parte de paguo da empreytada, que ora novamente com elle he feita sobre fazimento das abobadas e pyllares do cruzeyro da Igreja de Bellem, os quaes lhe ade emtregar a certos tempos conteudos nelle, pello quall vos mandamos que vos entregues os ditos mil cruzados ao dito Pero Lopez aos tempos conteudos no dito desembarguo, que hasy pera elle pasamos e per este com seu conhecimento em forma mandamos que vos sejam levados em conta». ANTT, 1ère partie, mss 28, nº 90.

[126] CORREIA, Vergílio, *As Obras de Santa Maria de Belém de 1514 a 1519*, Tip. do Anuário Comercial, Lisboa, 1922, p. 40

Or, si l'on était aux cimaises en 1516, autrement dit vers le sommet, cela indiquerait que les tas de charge étaient déjà présents du temps de Boitaca et que le projet de la voûte était déjà conçu. Il s'agit d'un processus de construction normal, puisque les tas de charge font partie du mur et qu'ils restent en attente jusqu'à ce que les voûtes soient construites.

Mendes Atanázio, qui attribue le projet à Castilho, a toutefois relevé plusieurs détails qui lui font suggérer avec pertinence que les murs étaient antérieurs à la *conception* de la voûte : les contreforts ne sont pas alignés avec les piliers ; une des fenêtres est bouchée par la tribune ; la voûte n'est pas alignée par rapport à l'axe des fenêtres ; le mur nord de l'église n'est pas parallèle au mur du cloître, et ; la travée du chœur est plus courte que les autres.[127] Et effectivement, nous avons confirmé tout ceci lors de notre relevé de 1995.[128]

Selon Atanázio, la nef actuelle était l'ancienne croisée réservée au public et le transept actuel nord-sud était la nef réservée au culte. La chapelle nord aurait été le chœur, où d'ailleurs la console centrale porte les armoiries royales et où le roi Dom Manuel a demandé d'être inhumé. Contrairement à d'autres auteurs, Atanázio considère qu'il n'y avait rien à l'emplacement du chœur actuel. Pour soutenir cette idée, il renvoie notamment à un texte de Frei José Siguença, chroniqueur de l'ordre des Hiéronymites du début du 16ème siècle qui reproche à l'architecte de faire reposer la voûte de la « croisée sur des piliers trop légers et trop minces ». Concernant le cloître, il l'attribue en totalité à Castilho, ne serait-ce que pour le projet, dit-il, puisque la section des piliers est constituée d'un seul bloc de pierre et qu'on retrouve la même décoration dans les deux étages du cloître, ce qui confirme un projet initial unique.[129]

Dans son texte *O Mistério de Belém*, Coelho admet que les travaux ont été en quasi-totalité réalisés par Castilho, mais il préfère attribuer le projet à Boitaca en se basant notamment sur l'interprétation du texte de l'ordre de paiement à Castilho de septembre 1522, évoqué plus haut, dans lequel le roi Dom João III écrit

> « ...que entregue a João de Catyllo, mestre de obras de Bellem, mil cruzados em parte do pago da empreitada, que ora novamente com elle he feita sobre o fazimento das abobadas e pylares do cruzeiro da Igreja de Bellem… ».

Coelho estime que la phrase est ambiguë, et elle hésite entre différents sens à donner au texte : « Castillo a eu auparavant une autre entreprise ayant le même objet » ou « il allait refaire le travail déjà fait par un autre architecte » ou que « à João de Castilho n'avait été confiée que l'entreprise visant à achever un chantier déjà planifié

[127] ATANÁZIO, M. C. Mendes, 'Contributo de João de Castilho para o espaço e estrutura da arquitectura do manuelino, As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos descobrimentos', in, *II Simpósio Luso-Espanhol de História da Arte*, Ed. Minerva, Coimbra, 1987, pp.260-271.

[128] MONTEIRO, Soraya M.G.M., *Étude descriptive de la voûte de l'Église du Monastère Santa Maria de Belém à Lisbonne*, Thèse "Master of Science in Architecture", R. Lemaire, Center for the Conservation of Historic Towns and Buildings, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 1995 (non publié), pp. 84-91.

[129] ATANÁZIO, M.C. Mendes, 'Contributo de João de Castilho para o espaço e estrutura da arquitectura do manuelino, As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos descobrimentos', in, *II Simpósio Luso-Espanhol de História da Arte*, Ed. Minerva, Coimbra, 1987, pp.261-269.

et déjà commencé ». Et l'auteur penche pour cette dernière hypothèse. Il s'appuie également sur un manuscrit de Frei Jacinto de São Miguel (1692-1761), maître de théologie et chroniqueur de l'ordre de Saint Jérôme, qui affirme que « l'architecte de cette fabrique admirable s'appelait maître Boytac, qui était un Français de par sa nationalité ». Pedro Dias a lancé une recherche sur l'architecture qu'il qualifie de « boïtaquienne » en vue d'élucider ses qualités artistiques et techniques, seule manière d'arriver à trancher cette question. [130]

En ce qui concerne le cloître, la plupart des auteurs ne prennent pas parti.[131] Lina Marques, qui a étudié le cloître, rejette l'attribution à Boitaca, en soulignant que le dossier des travaux ne mentionne le nom de Boitaca pour la première fois qu'en mars 1514, en première ligne, et elle note l'expression « Maître Boytaca a commencé à servir », expression qu'on ne retrouve pas en 1516, lorsqu'il dirigeait encore les travaux.[132]

Barreira et Moreira ne prennent pas parti dans la problématique de la paternité du projet. Ils relèvent le penchant Renaissance de Castilho : pour Barreira, l'avènement de l'arc surbaissé dans le cloître marque le début de la conversion de João de Castilho au goût de la Renaissance.[133] Moreira identifie le caractère proto-Renaissance de Castilho dans l'horizontalité des balcons et des cimaises, qui diffèrent de la verticalité gothique de Boitaca. Il reconnaît qu'il s'agit d'une question qui ne trouvera sa réponse que lorsque «seront élucidés certains aspects concernant les innovations introduites là par Castilho en matière de structure, de technique de tracé et de méthodologie de travail ». [134]

Pedro Dias a émis une idée que nous jugeons très pertinente. Il souligne que Castilho supervisait plusieurs entreprises (marchés de travaux) et que le chantier du portail, du cloître et de la sacristie constituaient son entreprise. Il considère que Castilho aurait modifié le plan initial de Boitaca et il lui attribue le voûtement de l'église, notamment le transept, la salle du chapitre, la sacristie, le réfectoire, la majeure partie du cloître et les deux portails de l'église. « Le cloître, [au] 1er étage est quasiment totalement de Castilho (d'ailleurs, les décorations ne rappellent en rien Boutaca), par contre une partie du 2ème étage est de Torralva ainsi que la cimaise qui sépare les deux étages. Dans l'enceinte, on trouve aussi de JC la chapelle de Santo

[130] COELHO, Maria da Conceição Pires, *Contributo de João de Castilho para a génese da arquitectura do Renascimento em Portugal*, Livraria Minerva, Coimbra, 1987, pp. 349-369. Traduction de l'ordre de payement de Dom João III «... que à nouveau avec lui (Castilho) on fait sur la construction des voûtes et des piliers de la croisée de l'Église de Bellem…». ANTT, 1ère partie, mss 28, nº 90.

[131] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, pp.123-124 ; BARREIRA, João, "O goticismo de João de Castilho", in Sep. da *Revista da Faculdade de Letras*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1933, pp. 206-208.

[132] MARQUES, Lina M. Oliveira, 'O Claustro do Mosteiro de Santa Maria de Belém' in, *Cadernos de História de Arte I*, Lisboa, 1991 pp.40-42

[133] BARREIRA, João, "O goticismo de João de Castilho", in Sep. da *Revista da Faculdade de Letras*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1933, pp. 206-208.

[134] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal: a encomenda régia entre o moderno e o romano*, (texto policopiado), tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências Socais e Humanas, Universidade Nova, Lisboa, 1991, pp.450-454.

Cristo, bien que la plus connue soit celle de São Jerónimo, de Boutaca ».[135]

Martinez et Silva attribuent le projet de l'église à Boitaca. Castilho a été chargé de renforcer le transept par des nervures supplémentaires. Ils identifient dans le transept des caractéristiques de son architecture, notamment les nervures courbes sur des modèles conventionnels en forme d'étoile. Dans la nef, ils ne retrouvent pas les étoiles mais bien des formes triangulaires qui remplacent les arcs principaux, caractéristiques de Boitaca. Ils comparent cette voûte avec d'autres, qu'ils attribuent à Boitaca, comme celle de la croisée de l'église du monastère de Santa Cruz de Coimbra et la voûte de la tribune et de la sacristie de l'église du couvent de Nossa Senhora da Pena, dans la montagne de Sintra. Ils considèrent que la nef de Jerónimos est du même type que ces deux dernières voûtes, avec des nervures qui forment des triangles au sommet et unifient les travées. Ils estiment qu'il s'agit d'une influence de l'école castillane de Juan Guas, à l'exemple de la croisée du couvent Santa Cruz de Ségovie, du cloître de Cartuja El Paular, de l'église du couvent Santo Tomás d'Avila et de la grande chapelle (*Capela Mayor*) de la collégiale San Isidoro de Léon. [136]

Les sources documentaires que présentent Martinez et Silva pour les attributions à Boitaca sont fragiles. Un document de 1507 concernant la construction du palais de Sintra, dans lequel il est dit que Boitaca fournissait des matériaux pour les travaux en 1507, constituent, selon ces auteurs, la preuve de l'identité de l'auteur de l'église du couvent de Pena, à Sintra. [137] Ce point ne pourra probablement être éclairci que moyennant des études complémentaires sur l'œuvre de Boitaca, à travers une analyse comparative entre les deux architectes Castilho et Boitaca.

Les losanges disposés au sommet sont effectivement caractéristiques de l'architecture de Guas, et peut-être sont-ils propres à Boitaca en supposant que la croisée de Santa Cruz de Coimbra est de lui. Cependant, ni la nef ni le transept de Jerónimos ne répondent à ce type, comme nous le verrons plus loin. Notre étude de 1995 présente des preuves suffisantes de la similitude de ces deux voûtes. Il ne s'agit pas seulement des losanges au sommet ; les arcs traditionnels (transversaux, longitudinaux et diagonaux) sont remplacés par des paires de triangles qui se contrebutent en formant des étoiles à quatre branches, tant dans la nef que dans le transept. Dans la nef, à ces formes de nervures droites, sont accouplés les *combados* au niveau des zones d'intersection de la voûte, là où se forme la surface continue de la voûte en berceau. Les figures carrées au centre de la nef deviennent une demi-circonférence sur la dernière travée pour

[135] DIAS, Pedro, 'João de Castilho e o desenvolvimento da arquitectura manuelina', in *História da Arte em Portugal*, Publicações Alfa, Lisboa, 1986, pp. 62-67.
[136] MARTINEZ, J.G. ; SILVA, R., 'Huguet, Boytac y el tardogótico peninsular', in *O largo tempo do Renascimento. Arte, propaganda e poder* , pp.327-342.
[137] MARTINEZ, J.G., SILVA, R., 'Huguet, Boytac y el tardogótico peninsular', in *O largo tempo do Renascimento. Arte, propaganda e poder*, p.334.

faire la liaison avec le transept. [138]

1.4.4 *Couvent du Christ à Tomar*

La partie du couvent du Christ *(*annexe PT-Sa7) qui est en construction dès 1530 est « un des plus importants édifices de la Première Renaissance ibérique ». [139] Il voit le jour suite à une réforme de l'Ordre du Christ [fondé en 1319, il remplace celui des Templiers dissous en 1312] lancée par le hiéronymite Frei António de Lisboa, directement avec l'aval du roi. Il s'étend à l'ouest du château primitif et de la Rotonde des Templiers, transformée en chœur de l'église sur un projet de Diogo de Arruda (1510-1515).

À partir de 1515, Castilho remplace Arruda à la direction des travaux, celui-ci étant parti en Afrique pour des travaux. Dans une première phase, qui précède la réforme de l'Ordre, sous le règne de Dom Manuel I, il y réalise plusieurs ouvrages, tel que l'arche du passage vers le déambulatoire, les voûtes de la tribune, le portail principal de l'église qu'il a signé et daté *João de Castilho construiu em 1515 (Figure 2).* [140]

[138] MONTEIRO, Soraya M.G.M., *Étude descriptive de la voûte de l'Église du Monastère Santa Maria de Belém à Lisbonne*, thèse en "Master of Science in Architecture", R. Lemaire, Center for the Conservation of Historic Towns and Buildings, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 1995. (non publié).
[139] PEREIRA, Paulo, *De Aurea Aetate - o coro do Convento de Cristo em Tomar e a simbólica Manuelina*, Lisboa, Departamento de Estudos IPPAR, 2003, 15, n. 11.
[140] DIAS, Pedro, 'João de Castilho e o desenvolvimento da arquitectura manuelina', in *História da Arte em Portugal*, Lisboa, Publicações Alfa, 1986, p. 59.

Le couvent du Christ de Tomar fut l'œuvre majeure de Castilho. Cet ensemble monumental peut lui être attribué en grande partie, comme l'attestent des sources documentaires.

Il a vécu la majeure partie de sa vie à Tomar et c'est là qu'il réalisera aussi ses derniers ouvrages. En 1519, il abandonne Belém pour s'installer définitivement à Tomar. Cette année-là, alors qu'il dirigeait déjà des travaux de Tomar, il fait construire, sur un terrain contigu à la carrière, un abri pour que les ouvriers puissent tailler les pierres destinées au couvent du Christ. Comme il utilisait indûment le terrain, qui n'était pas à lui, il y eut un litige avec le propriétaire, qui fut résolu par voie de justice. Castilho affirmait en effet ne vouloir sortir de là que si un juge le lui ordonnait et que, même ainsi, il s'en plaindrait au roi. Il disait que le roi l'avait envoyé à Tomar pour réaliser ces travaux, que la carrière était là, et que donc, on ne pouvait installer l'abri des tailleurs de pierre qu'à cet endroit-là. Du procès-verbal du tribunal relatif à ce conflit, nous donnons ici les questions faites à Castilho, que le juge a tenu à faire mettre par écrit : « It. Premièrement, si la carrière devait être là sur le lieu du différend : vous avez dit que oui. It. Je vous ai demandé si on pourrait la faire ailleurs et avec moins de dommages pour le plaignant : vous avez dit que non ». [141]

Plus tard, à l'époque de la réforme de l'Ordre, Castilho remporta le marché du grand ouvrage de Tomar en 1530 sur l'appel d'offres

[141] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.188.

lancé par Frei António de Lisboa. « Le Roi a parlé à notre Réformateur, et il lui a dit qu'il voulait faire un monastère et un couvent pouvant accueillir beaucoup de religieux, et ainsi, il ordonna aussitôt qu'on recherchât un architecte et il chargea de cette tâche notre très révérend père et maître. Et il en vint beaucoup, et ils firent de nombreux plans et brouillons. Et ils furent examinés longuement, et celui qui lui plut le plus fut celui de João de Castilho, et il le porta au roi, qui lui ordonna de hâter le chantier. Et vu le plaisir que lui donnait le travail de João de Castilho, le Père demanda au Roi de lui faire porter l'habit du Christ, ce que notre Père fit avec l'approbation du roi, et c'est avec cet habit que Castilho a poursuivi les travaux du couvent tracé par lui et qu'il termina en 9 ans, comme le montre l'inscription qui est à la porte du Père Procureur (...)». [142]

Comme le montre la lecture de ce document, en 1530, le roi Dom João III avait vu de nombreux dessins et rencontré de nombreuses personnes pour le nouveau couvent, et après mûre réflexion, le roi a choisi la proposition qui lui avait été présentée en dessin par João de Castilho.

En 1530, lorsque le roi Dom João III sélectionne les dessins de Castilho et lui commande les travaux du couvent, celui-ci avait déjà réalisé plusieurs chantiers pour lui ailleurs au Portugal. Ces chantiers figurent dans une lettre de Dom João III datée du 30 juillet 1533[143] : «... je fais savoir qu'il a été demandé pour moi à João de Castilho, chevalier de ma maison et maître de mes travaux, de réaliser les travaux déclaré ci-dessous– le travail du monastère de Belém et le chantier de Paços da Ribeira dans la ville de Lisbonne, les balcons, salle et escalier, chapelle et maisons de la Reine (…) le chœur du monastère de sam Francisco de cette même ville, et les fondations de la chapelle qui sont dans l'entrepôt et un balcon à Santos et d'autres petites choses qu'il a faites dans lesdits palais - portails, fenêtres, margelle du puits et remaniements du jardin, et ainsi le chantier de l'infirmerie qui était fait pour les malades de ladite cité, et les géants de pierre qu'il a faits dans la Rivière pour mettre à sec les navires de

[142] COELHO, Maria da Conceição Pires, *Contributo de João de Castilho para a génese da arquitectura do Renascimento em Portugal*, Livraria Minerva, Coimbra, 1987, p. 375, il s'agit d'un document conservé aux archives de Torre do Tombo, réference : ANTT, *Ordem de Cristo. Conventos Diversos*, B-51-34, nº 796, fls. 4.

[143] SÁ, Maria Ealo de, *El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos*, vol. II, Merindad de Trasmiera 1992, p. 43; VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, Vol.I, pp.191-193. Transcription de la lettre de Dom João III datée du 30 juillet 1533 "…faço saber que João de Castilho, cavaleiro de minha casa mestre de minhas obras, por mim lhe foram mandadas fazer as obras abaixo declaradas - a obra do mosteiro de Belém e a obra dos Paços da Ribeira da cidade de Lisboa, as varandas, sala e escada capela e casas de Rainha (…) a capela moor do mosteiro de sam Francisco da dita cidade, e os alicerses da capela que estão no armazem e uma varanda em Santos e outras cousas meudas que fez nos ditos paços - portões, janelas, bocall do poço e corregymento do jardym, e assim as obras da enfermaria que se fazia entre os doentes da dita cidade, e gigantes de pedra que fez na Ribeira para varar as naos da Imdia e asy as obras que fez no Convento de Thomar – la tribune, le chapitre, le grand arc de l'église, la porte principal, les maisons pour les « aposentos da Rainha » e outras cousas meudas que fez no dito convento, e asy as obras que fez pera as ferrarias da dita vila, e asy todas as obras que fez no mosteiro de Alccobaça e todas as que fez no mosteiro da Batalha, algumas por contratos e outras sem elles (…).a obra de Tomar, que o dito João de Castilho ora faz, que se começou a 30 dias do mês de junho de 1533...". ANTT, *Chancelaria de D. João III*, liv. 34, fol. 2, v.

l'Inde et ainsi les travaux qu'il a faits au couvent de Tomar – la tribune, le chapitre, le grand arc de l'église, la porte principale, les maisons pour les « appartements de la Reine» et les autre petites choses qu'il a faites dans ledit couvent, et ainsi les ouvrages qu'il a fait pour les ferronneries de ladite ville, et ainsi tous les travaux qu'il a faits au monastère d'Alcobaça et au monastère de Batalha, certains par contrats et d'autres sans eux (…). Le chantier de Tomar, que ledit João de Castilho fait maintenant, qui a commencé le 30 juin de 1533…».

Nous relevons dans ce texte que, alors que certains édifices sont désignés par leurs parties concernées, à propos de Belém il est dit « le travail (*obra*) du monastère », expression par laquelle, pensons-nous, il désigne la totalité du chantier.

Nous traduisons le contrat rédigé pour la construction du cloître principal, qui nous renseigne la forme de la voûte et la hauteur des arcs. Le contrat fut signé le 30 juin 1533 entre le régisseur de la maison de Dom João III et João de Castilho et il y est dit que Castilho réalisera les travaux « selon la teneur et l'agencement des textes et des dessins qui sont dressés et signés par ledit régisseur à cette fin ». Et concernant le cloître principal il est écrit que les voûtes «... avec des croisées et des clefs elles ne seront qu'en berceau en plein cintre, avec ses arcs seulement au droit des contreforts dudit cloître, lesquels bougeront des Appuis comme indiqué sur ledit dessin, et leurs cimaises seront autour de l'endroit où lesdites voûtes doivent bouger des deux côtés et elles seront de bonne facture travaillées pour être « à la romaine » et elles (les consoles) seront saillantes d'1 paume[144] et en hauteur 1 paume et trois doigts, et leur assise sera au-dessus du point des arcs et dans l'autre partie dans le même alignement desdits arcs seront taillés d'une bonne taille plane à la romaine, et auront en largeur dois paumes et en hauteur ½ paume et les quatre chapelles qui doivent être faites dans les quatre angles dudit cloître, seront faites selon la teneur et l'ordonnance du dessin avec leur croisée à la Romaine, d'une taille très ordonnée et la clef principale aura trois paumes et

[144] Rafael Moreira, en 1991, a transcrit un document officiel de mesure, de la maison de Castilho à Belém (près de l'obélisque de Chão Salgado, dans la Rua de Belém), trouvé annexé au dossier du comte de Santa Cruz, un siècle après, lorsque celui-ci voulu agrandir la maison qui appartenait autrefois à Castilho :
"Mesure des sols des maisons et verger que prit Jº de Castilho maître de cet ouvrage de Belém : nous avons mesuré avec Fernan et en présence de Joham de Castilho le sol sur lequel il a faites (sic) *les maisons où demeure ledit Joham de Castilho avec ce qu'il prend pour les cours et maisons de derrière celles qu'il a faites et nous avons trouvé ce qui suit :*
Nous avons trouvé de la bande de la mer le long de la rue dix brasses (1 brasse = 2,2 m). *Nous avons trouvé de la partie de la mer vers le haut au nord de la bande du monastère en longueur dix-huit brasses (...) de la bande donde tem Escalante começadas les maisons sont en longueur à nouveau de dix-huit brasses ; et ces brasses todas sam cravejras. Faites par lui Joham de Castilho».*
Moreira souligne l'importance de ce document qui nous fournit la *«craveira»* (instrument qui servait de d'étalon). En comparant avec le plan du palais postérieur des Mascarenhas, qu'occuperont ensuite les ducs d'Aveiro, la maison formait un bloc de 10 brasses, ou 100 paumes.

demi, et les cloîtres de trois paumes ».[145]

Ce contrat dicte quelles sont les dimensions d'ensemble et la forme de l'arc. Les arcs étaient tracés et ordonnés selon la façon dont ils « bougent » sur la console. Le terme « croisée à la romaine » *(cruzaria ao romano*) et la description de la voûte indique qu'il s'agit du même type de voûte en réseau que dans les autres cloîtres du couvent. La voûte prend une forme en berceau à nervures croisées.

Moreira remarque son attachement aux voûtes à nervures, « le principal ennemi de la voûte Renaissance », que Castilho rejeta seulement à la fin de sa vie.[146] Cependant, nous considérons ces voûtes comme des exemples de premier ordre du nouveau « gothique de la Renaissance » considéré comme moderne et innovant à l'époque, et partie intégrante de l'avant-garde de l'époque, comme le suggère d'ailleurs leur taille « à la romaine ».[147]

Barreira commente le gothique dans la structure de Castilho parce que celui-ci utilise des nervures, alors qu'en Italie, la Renaissance était déjà dépassée et qu'on évoluait vers le Baroque. Il interprète de deux manières l'expression « croisée à la romaine » utilisée pour les chapelles du cloître : « l'on fait référence soit à des bandes croisées qui remplacèrent les nervures saillantes des berceaux qui étaient alors en usage, ou alors, plus probablement, s'agissant d'angles, soit aux voûtes d'arêtes qu'on trouve au croisement des longs berceaux des couloirs. (…) les cloîtres du couvent du Christ sont tracés invariablement selon les principes de la croisée, parfois des douelles sont abattues et tellement longues qu'elles en sont monolithiques et jouent le rôle de véritables architraves». [148]

Après 1533, sur une commande du roi Dom João III, il bâtit les cinq cloîtres - le cloître principal et cloître de Micha, cloître de Corvos, cloître hospitalier, cloître Santa. Bárbara - le réfectoire, la cuisine et le cellier, les dortoirs et d'autres dépendances. Le cloître principal, décrit en détail dans le contrat ici retranscrit, sera démoli par la suite et pour être reconstruit par Diogo Torralva.

Bien que le couvent du Christ de Tomar ait été un des chantiers les

[145] BARREIRA, João, "O goticismo de João de Castilho", in Sep. da *Revista da Faculdade de Letras*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1933, pp.210-211. Transcription du contrat rédigé pour la construction du cloître principal : « …pelo theor e ordenança dos emlegimentos e debuxos que para isso são feitos e assinados pelo dito amo (…) posto que a ordenança e o enlegimento dessas abobadas estê emlegido com cruzeiros e chaves não serã senã de berço em volta Redonda, com seus arquos somente em direito dos botaréus da dita crasta, os quaes moverão das Reprezas assim com vã ordenados no dito debuxo, e averã suas çimalhas a Roda de que as ditas abobadas ã de mover dambas as partes e serão dallgua boa moldura lavradas que bê pareça ao Romano e terão de sacada hu pallmo[145] e dalto um pallmo e tres dedos, e o assento dellas será por çima do ponto dos arcos e na outra parte no mesmo direito dos ditos arcos serã lavrados allgua boa obra chãa ao Romano, e terão de largo dous pallmos e dalto meo pallmo e as quatro capelas que se ã de fazêr nas quatro engas da dita crasta, serão pelo theor e ordenança de debuxo com sua cruzaria ao Romano (croisée à la romaine), com sua talha mui ordenada e a chave principal serã tres pallmos e meo, e as crastas de tres pallmos ».

[146] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal: a encomenda régia entre o moderno e o romano*, (texte polycopié), thèse de Doctorat, Faculdade de Ciências Socais e Humanas, Universidade Nova, Lisboa, 1991, p.498.

[147] *Le Gothique de la Renaissance*, (De Jonge Krista, Ed. Chatenet Monique, Ed. Kavaler Ethan, Ed. Nussbaum Norbert, Ed.), De Architectura, Picard, Paris, 2011.

[148] BARREIRA, João, "O goticismo de João de Castilho", in Sep. da *Revista da Faculdade de Letras*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1933, pp.211-212.

plus importants de Castilho, lequel y consacra de nombreuses années, nous savons qu'entre 1541 et 1542 il interrompt les travaux de Tomar pour construire la forteresse de Mazagão (El Jadida) au Maroc, que nous évoquons par ailleurs.

Il est intéressant d'analyser la progression des travaux pour mieux comprendre à la fois le couvent et l'évolution du style des voûtes de João de Castilho, dont le caractère Renaissance s'affirme progressivement. Nous procédons à cette analyse en évoquant plusieurs lettres que Castilho envoya à son roi,[149] des lettres dans lesquelles on remarque l'attachement de João de Castilho à son travail, puisqu'il restera en chantier même lorsqu'il est malade.

En mars 1548, Castilho écrit au roi Dom João III pour l'informer qu'il a déjà fait tailler plus de 1000 charrettes de pierres mais qu'il n'a pas assez de bœufs pour les amener en chantier car les trois bœufs qui lui restent ne suffisent plus à assurer le transport. Il dit avoir besoin de cinq bœufs supplémentaires et s'il ne va pas en acheter lui-même c'est parce qu'il est très malade : « Tant que j'avais des bœufs, jamais la pierre ne m'a fait défaut en chantier et ils aidaient parfois même le père (religieux) : finalement, ils eurent tant de travail que cela fut leur fin : Et s'il n'y avait pas cette maladie que j'ai et qui m'a laissé tellement épuisé comme Dieu sait, je m'arrangerais pour en trouver, mais je n'y suis pas arrivé, Dieu me sauve». [150]

Outre ce problème de manque de bœufs pour transporter la pierre de taille entre la carrière et le chantier, il explique également l'avancement du chantier de Tomar en mars 1548. Les murs des salles d'étude des collégiales n'étaient pas encore totalement construits, les salles de bain du dortoir des religieux de l'étage supérieur devaient encore être construites, les portes et les fenêtres devaient elles aussi être achevées. Cette situation découlait de ce manque de pierres, qui ne parvenaient plus au chantier depuis trois mois.[151] Outre ce problème, les travaux de charpente du dortoir situé au-dessus des salles études des collégiales n'avaient même pas encore commencé parce que Simão Dias n'avait ni bois, ni argent et que ses hommes étaient peu nombreux : « Simão Dias n'apporte que très peu de gens et à ce propos il serait bon de commencer à tailler le bois pour le dortoir situé au-dessus des salles d'études : je lui en parle tous les jours et il me dit qu'il n'a pas de livraison de bois ni non plus d'argent et si V.A. souhaite tant voir ces travaux terminés, ordonnez qu'on en donne, parce que là où on a déjà tellement dépensé, il n'y a aucune raison qu'on en manque (d'argent)

[149] SÁ, Maria Ealo de, El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos, vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992; VITERBO, Francisco de Sousa, Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, pp.183-204.

[150] VITERBO, Francisco de Sousa, Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, pp.198-199; SÁ, Maria Ealo de, El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.68. ANTT, *Corpo Chronologico,* 1ere partie, mss 80, doc. 46.

[151] VITERBO, Francisco de Sousa, Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal, 3 Vols., Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, pp.198-199 ; SÁ, Maria Ealo de, El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.68.

maintenant pour le peu qu'il reste à faire ». [152]

Castilho dit encore qu'il a envoyé au roi une note concernant la construction de la cellule du Prieur ainsi que le couloir au-dessus de la bibliothèque, en soulignant que le Prieur voulait que le chantier avance : « J'ai également envoyé une note à V.A. concernant la cellule de monsieur le prieur et le couloir de la terrasse en toiture au-dessus la bibliothèque et il me presse et il sera nécessaire de faire ce qu'il veut, comme je lai déjà fait pour lui pour toutes les autres choses ». [153]

Dans une autre lettre, datée de septembre 1548, il se plaint à nouveau au roi qu'il ne parvient pas à terminer les travaux de Tomar par manque de moyens de transport pour la pierre. Dans cette lettre, dans laquelle il déclare être désespéré de ne pouvoir servir le roi comme il le voudrait, il consulte aussi celui-ci à propos des fenêtres du noviciat, lesquelles ne présentent pas toutes les mêmes dimensions, en fonction des niveaux et des dépendances, à cause de Simão Dias qui n'a pas voulu faire des châssis en bois d'une seule et même mesure. Mais si le roi le souhaite, Castilho dit qu'il fera élargir les baies. Et pour que le roi Dom João III puisse réfléchir à la question, Castilho écrit qu'il lui fait envoyer une ébauche, un dessin pour illustrer l'état de cette partie du chantier : « Concernant les miroirs [les vitres, probablement] du noviciat, j'ai choisi de vous les envoyer maintenant tels qu'ils sont, et o ellegimeto des maisons V.A. verra tout et voyez ce que vous souhaitez encore, parce que les maisons sont très claires et les miroirs seront conformes à la menuiserie tels quels. … Et à travers cette ébauche V.A. pourra voir ce qui lui paraît convenir le mieux ». [154]

Toujours dans cette même lettre de septembre 1548, Castilho se plaint au roi que le Prieur devrait lui fournir des hommes pour retirer la pierre qui encombre le cloître des fours et qu'il destine à la construction de la citerne, ce que le Prieur ne fait pas : « Je baiserai les mains de V.A. de lui ordonner de, pour ceci et pour les autres choses qui me seront nécessaires, me donner des gens du métier ». [155]

En septembre 1548, Castilho est fatigué et il a des dettes. Il veut achever le chantier le couvent de Tomar au plus vite : « Je souhaite

[152] VITERBO, Francisco de Sousa, Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, pp.198-199 ; SÁ, Maria Ealo de, El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.68.

[153] VITERBO, Francisco de Sousa, Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, pp.198-199 ; SÁ, Maria Ealo de, El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.68.

[154] VITERBO, Francisco de Sousa, Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.199; SÁ, Maria Ealo de, El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.75. ANTT, *Corpo Chronologico,* 1ere partie, mss 80, doc. 46.

[155] VITERBO, Francisco de Sousa, Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.200; SÁ, Maria Ealo de, El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.75.

mettre fin à ce chantier pour payer mes dettes et me libérer de tant de travaux et de fatigues ». [156]

Mais en 1551, le chantier doit encore être achevé et il écrit une lettre au roi pour lui faire une description détaillée du chantier, dépendance par dépendance. La cuisine et la maison des novices étaient en travaux, on carrelait le cellier et la terrasse de l'étage du dortoir au-dessus des cellules des collégiens et, au-dessus de la bibliothèque, la terrasse de l'infirmerie était presque achevée. On construisit un accès à l'horloge à l'étage supérieur du cloître. Quant aux cellules des collégiales, il explique quel type de brique il souhaite utiliser la brique frottée (*tijolo roçado*), mais que la partie extérieure, il préfère la brique non frottée (*por roçar*) parce que sa résistance à l'eau est meilleure. Il informe également que : « Je n'ai pas posé les colonnes de la maison des novices afin que les charpentiers ne me cassent pas les chapiteaux ». Finalement, il fait remarquer au roi que le pont de Tomar est fragilisé et que si rien n'est fait, il ne résistera pas à l'hiver.[157]

En mars 1551, Castilho était sur le grand chantier du couvent de Tomar et il écrit de là encore une fois à son souverain. Il s'agit de sa dernière lettre puisqu'il meurt un an plus tard.[158] João de Castilho est fier de l'escalier de la tribune qu'il a construit au couvent du Christ et il affirme qu'il s'agit d'un ouvrage de grande qualité, que Dom João III appréciera certainement quand il le verra : « J'ai largement transmis à V.A. l'information de ces travaux et de l'affaire du pont…De ces travaux, il n'y en a pas de nouveaux, il ne reste plus qu'à construire l'escalier de la tribune : c'est un très bon ouvrage que V.A. se réjouira de voir ». [159]

1.5 Autres ouvrages attribués

Outre les ouvrages étudiés plus haut, il en existe d'autres qui sont attribués à João de Castilho, soit par des sources documentaires soit à travers des études d'architecture.

Atanázio retrouve des influences de João de Castilho dans l'église de Caminha (annexe PT-VC1), attribuée à Pero Galego. Il y

[156] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, 3 Vols., Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.200; SÁ, Maria Ealo de, *El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos*, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.75. ANTT, *Corpo Chronologico,* 1ere partie, mss 81, doc. 40.

[157] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, 3 Vols., Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, pp.200-201 ; SÁ, Maria Ealo de, *El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos*, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.81. ANTT, *Corpo Chronologico,* 1ere partie, mss 87, doc. 35.

[158] SÁ, Maria Ealo de, *El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos*, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.83. Sá situe la mort de Castilho en 1552 en se fondant sur le fait qu'une fille de lui, du nom de Maria, reçut, le 1 janvier 1553, 20.000 réaux par le testament de son père.

[159] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.200 ; SÁ, Maria Ealo de, *El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos*, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.77. ANTT, *Corpo Chronologico,* 1ere partie, mss 87, doc. 35.

remarque la voûte de la chapelle de Mareantes (des marins) et la continuité de l'espace obtenue par l'éclairage de la nef par des fenêtres alternées de chaque côté, qui sont alignées tantôt avec les piliers tantôt avec les travées.

Au monastère Santa Cruz de Coimbra (annexe PT-Co3), Atanázio suggère que Castilho aurait aidé son frère, Diogo de Castilho.[160] Ce fait est confirmé par la base de données descriptive des Archives de Torre de Tombo, disponible en ligne, qui rapporte que, entre 1528 et 1547, les travaux étaient dirigés par Diogo, João de Castilho, Nicolau de Chanterenne et João de Ruão, dans la séquence de la reforme du monastère, entamé par D. João III et frère Brás de Barros, de l'ordre de S. Jerónimo et frère António de Lisbonne initié le 13 octobre 1527.[161]

D'après la chronologie indiqué dans l'inventaire de IRHU, au 16ème siècle, trois architectes principaux ont dirigé les campagnes de reconstruction du monastère (en 1507, le roi ordonnait la démolition de l'église, du cloître et du chapitre) : le contrat avec Diogo Boitac date de 1513, pour l'exécution des voûtes du chœur, de la croisée et de la sacristie (postérieurement démolie et remplacé en 1662) ; en 1517, Marcos Pires est nommé maître de travaux et réalise 3 ailes du cloître, des chapelles de la bibliothèque et le scriptorium (avec des ouvriers de la fabrique de Belém) ; en 1518, Diogo de Castilho est maître carrier, payé pour le portail en 1522(et à maître Nicolau de Chanterenne). L'année 1522 marque la fin des travaux : ornementation de l'église et des tours, 4 portées voûtées du cloître, chapelle Saint-Jean, chapelle voûtée de São Teotonio et de São Miguel, dortoir, agrandissement du réfectoire. En 1522, il fallait encore achever le portique principal et la croisée, qui était à reconstruire.[162]

Moreira cite une série d'autres ouvrages : la fenêtre de la tribune de l'église São Julião à Setúbal (annexe PT-Se3), en 1521, le monastère de Cós, en 1527, des travaux au château d'Alcobaça, le deuxième cloître de Jerónimos, dont les travaux ont commencé entre 1525 et 1527, le palais ducal de Dom Jaime à Vila Viçosa, l'église d'Atalaia (annexe PT-Sa7) en 1526, le palais de Paço da Ribeira (balcons, grand salon et escalier, chapelle et appartements de la reine), les fondations de la chapelle de l'entrepôt de l'Inde, des petits travaux au palais royal de Santos (balcon, portails, fenêtres et jardin avec la margelle du puits), le chœur de l'église São Francisco à Lisbonne, construite par Pêro de Trilho, une infirmerie pour les malades de la peste, probablement dans l'hôpital de Todos-os-Santos, les « géants » de pierre des quais *Cais de Pedra*, à l'ouest de la douane à Terreiro do Paço, l'église de Misericórdia, un pont sur le Nabão, un pont à Guimarães, qui fut ultérieurement démoli, l'église matrice de Pias (actuellement, Areias), la maison Almeirim pour des frères religieux et pour lui, la *Quinta da Cardiga*, le couvent Santa Iria en

[160] ATANÁZIO, M. C. Mendes, 'Contributo de João de Castilho para o espaço e estrutura da arquitectura do manuelino, As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos descobrimentos', in, *II Simpósio Luso-Espanhol de História da Arte*, Ed. Minerva, Coimbra, 1987, p.262.

[161] http://digitarq.dgarq.gov.pt/details?id=1457739, archive digital de Torre do Tombo, code de référence PT/TT/MSCC (au 25/12/2012).

[162] Fiche IPA nº PT020603170004, IRHU.

1523, et aussi à Tomar, la *Casa dos Cubos*, les entrepôts et une grange au nord de la ville. [163]

Ealo de Sá est l'auteur qui attribue le plus grand nombre d'ouvrages à Castilho. Son livre, récemment publié, regorge d'informations et de documents. Cependant, la quantité d'ouvrages attribués nous semble ici exagérée. Ces attributions se fondent sur la présence d'un type de décor en fleur quadrilobée que cet auteur considère être caractéristique de João de Castilho. S'il est vrai qu'on retrouve cette fleur sur différents monuments de l'époque de Castilho, elle ne nous semble pour autant pas constituer une signature. D'ailleurs, de tels ornements, que beaucoup de pays revendiquent comme autant de caractéristiques « nationales » existent dans des monuments de toute l'Europe, car ils sont plus l'apanage d'une époque que d'un architecte ou d'un pays.

Parmi les bâtiments religieux, Ealo de Sá attribue à de João de Castilho plusieurs ouvrages, ou y relève son influence artistique : la basilique Santa Maria Maior de Pontevedra, la cathédrale de Viana do Castelo, la cathédrale de Guarda, le monastère Santa Maria la Real de Oseira à Ourense, le couvent Santa Clara à Vila do Conde, le couvent San Antonio de Ferreirim, le couvent hiéronymite de Pena à Sintra (l'actuel Palais national de Pena de Sintra), l'agrandissement du palais de Sintra, l'église San Pedro de Castillo, l'église San Andrés d'Omoño, l'église San Miguel de Heras, l'église Santa María de Cudeyo, Valdecilla, Solares, l'église Santa María de Los Ángeles de San Vicente de la Barquera, l'église Santa María de las Areas de Finisterre, l'église de Monção, l'église Nossa Senhora da Oliveira de Guimarães, l'église du couvent São Francisco à Porto (annexe PT-Px1), l'église de Cete, l'église de Santo Tirso, l'église de Misericórdia à Freixo de Espada-à-Cinta, l'église Nossa Senhora da Veiga à Vila Nova de Foz Coa ; à Lisbonne, la chapelle São Jerónimo (annexe PT-Lx2), la chapelle de Santo Cristo (annexe PT-Lx4), l'église de Conceição Velha, l'église matrice de São João Degolado, la chapelle São Sebastião, l'église Nossa Senhora da Purificação et l'église matrice São João Baptista à Sintra. L'église Nossa Senhora de Rocamador et la chapelle de Espírito Santo à Cheleiros (Mafra) et la chapelle de Espírito Santo à São Miguel de Alcainça (Mafra). L'église São Quintino à Sobral de Monte Agraço, la porte du cloître du monastère de Varatojo à Torres Vedras. L'église São Julião à Setúbal, l'église de Marvila à Santarém (anexe PT-Sa3), l'église Nossa Senhora da Conceição à Golegã (annexe PT-Sa2), l'église Nossa Senhora da Assunção à Vila Nova da Barquinha, la chapelle São Gregório, le couvent Santa Iria, l'église Santa Maria do Olival et l'ermitage Nossa Senhora da Conceição à Tomar, l'église Nossa Senhora da Graça (ancienne église de Pias), à Areias Ferreira do Zêzere. Église de Misericórdia à Pinhel, l'église Nossa Senhora da Conceição, à Covilhã, l'église de Misericórdia à Penamacor, l'église Nossa Senhora do Bispo, le couvent Nossa Senhora da Misericórdia et le couvent São Francisco à Montemor-o-Novo. L'église Nossa Senhora da Assunção, à Viana do Alentejo. L'église Nossa Senhora da Consolação à Azuaga, l'église Nossa

[163] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal. A Encomenda Régia entre o Moderno e o Romano.* Thèse de doctorat en Histoire de l'Art. Lisbonne. Universidade Nova de Lisboa, 1991, pp. 446-538.

Senhora dos Anjos et la cathédrale de Badajoz. L'attribution reprend également plusieurs bâtiments civils en Espagne et au Portugal. [164]

Cet auteur lui attribue le remaniement de l'église Santa Maria do Olival, à Tomar, l'église panthéon des Maîtres-Templiers, ensuite de l'Ordre du Christ, où 22 maîtres templiers furent enterrés. Sá rappelle à cet égard qu'il existe une hypothèse selon laquelle João de Castilho y serait enterré. Les modifications apportées par Castilho à cette église comprennent une galerie latérale sud, cinq chapelles funéraires communiquant entre elles et disposées selon Sá comme une *loggia*, la porte d'accès, la voûte, identique à celles des cloîtres de Tomar, la tribune et la fenêtre de la sacristie qui porte l'inscription de l'année 1543. [165]

De la liste considérable d'ouvrages qui sont attribués à Castilho, il en est deux que nous voudrions évoquer particulièrement : la forteresse de Mazagão (aujourd'hui El Jadida) et l'ermitage Nossa Senhora da Conceição à Tomar.

João de Castilho a pris part à la construction d'ouvrages militaires en Afrique du nord. En 1529, il accompagne Duarte Coelho pour inspecter les forteresses, à un moment où on envisage de remanier les défenses de la ville selon les nouveaux concepts italiens de fortification.

En mai 1541, le roi Dom João III envoie en Afrique du nord l'ingénieur italien Benedetto de Ravena et Miguel de Arruda pour rejoindre Diogo de Torralva afin de renforcer Mazagão.[166] Le projet de Ravena représente la cité idéale de la Renaissance.

La construction de l'imposante forteresse fut dirigée en 1541 - 1542 par João de Castilho et par le capitaine João Ribeiro.[167] Et en dépit des difficultés d'extraction des pierres de la carrière, des conditions du sol rocheux et de la présence de la mer, les travaux des caves et des murailles à bastions n'auraient duré qu'un an. Dans une lettre écrite par Castilho au roi Dom João III depuis Mazagão, où il se trouvait en 1542, il écrit que l'Italien Benedetto de Ravena respecte les notes de Ravena pour cet ouvrage militaire : « Et en ce qui concerne ce que Votre Altesse a écrit, pour l'ouvrage, de ne pas s'écarter des notes de Benedito de Ravena, c'est toujours ainsi que j'ai procédé et que je procèderai ». [168]

Nous ignorons la teneur du projet de Ravena. Nous pensons qu'il s'agissait d'un plan d'ensemble mais que certains ouvrages ou éléments de construction déterminés – comme les voûtes de la citerne – sont de Castilho, lequel était à la fois maître d'œuvre et

[164] SÁ, María Ealo de, *El arquitecto Juan de Castillo, El constructor del Mundo*, Santander, Colegio Oficial de Arquitectos de Cantabria, 2009, pp.193-337.
[165] SÁ, María Ealo de, *El arquitecto Juan de Castillo, El constructor del Mundo*, Santander, Colegio Oficial de Arquitectos de Cantabria, 2009, pp.324-325.
[166] MOREIRA, Rafael, *A construção de Mazagão: cartas inéditas 1541-1542*, Lisboa, Instituto Português do Património Arquitectónico, 2001, p.43.
[167] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.194; SÁ, Maria Ealo de, *El Arquitecto Juan de Castillo, Documentos históricos*, Vol. II, Merindad de Trasmiera, 1992, p.50.
[168] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.194.

architecte (nous savons qu'il faisait des dessins pour Tomar, information que nous avons précédemment confirmée à travers des documents). La citerne de la forteresse de Mazagão porte indubitablement la marque de Castilho et sa voûte est, de fait, à rapprocher de celles de Tomar.

En 1542, dans le cadre du chantier de cette forteresse, Castilho envoie une liste de personnes qu'il souhaite avoir pour son chantier, des tailleurs de pierre choisis directement par Castilho, dont il connaissait la façon de travailler et sur qui il était sûr de pouvoir compter, notamment pour travailler jour et nuit. En effet, on ne trouvait jusqu'alors sur le chantier que des ouvriers sans expérience et bons à rien ce qui avait été doublement épuisant pour lui.

Dans sa demande, il demande spécifiquement des tailleurs de pierre de Tomar, de Torres Novas, Évora et Lisbonne.[169] Il indique aussi que, outre les travaux auxquels ils sont affectés pour construire la forteresse, ils pourront se battre au besoin, ce qui, en terre de conquête, serait assurément utile.[170]

Dans la longue lettre qu'il écrit au roi en 1542, Castilho commence en s'excusant de ne pas lui écrire plus souvent par manque de temps mais également parce que le roi ne lui a pas répondu sur certains aspects pourtant importants. Il fait l'éloge du capitaine, qui est à pied d'œuvre deux heures avant le lever du soleil. Il consacre une bonne partie de sa lettre à réclamer le paiement de ses hommes, qui sont malades, et l'envoi de meilleurs aliments. En effet, en Afrique, ses hommes ne mangent que des biscuits secs et durs qu'ils mettent à tremper dans de l'eau pendant des jours entiers au soleil et au vent de la carrière, un régime alimentaire insuffisant pour les gros efforts qu'ils doivent fournir. Et à la fin du jour, ils n'ont ni toit ni lit pour dormir.[171]

Le chantier de Mazagão se poursuivait sans interruption et João de Castilho a tenu à dire à son roi qu'il était sur le chantier de cette forteresse « du matin jusqu'au soir ».[172] Et dans une autre lettre, écrite au roi également depuis Mazagão, mais par Luís de Loureiro, ce dernier fait un éloge très spontané des capacités de

[169] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.195. *« A gête que mãdamos pedir a V.A. pera esta obra ca a mãdo toda per rol e destes se não hade escusar por que asy compre a seu serviço, e naõ patifes que qua vierão muitos que dez anos de vida me custa o tempo que há que ando entre eles, por que êfim qua não veio outra gente senão a que trouxe de Tomar e algûs oficiaes de Lixboa: e tãobem ora vyerão muitos cavouqueiros que ho nûqa foram, e por tanto cumpre a serviço de V.A. que a gête que aguora vier seja esta que vay apontada, por que he gête que eu conheço e sei como cada um lavra e farão tudo o que lhes eu madar nesta obra asy de noute como de dia» (...)« Esta gête que mãdo pedir a Vosa A. He pera trabalho e pera peleijar quando cumprir ».* ANTT, *Corpo Chronologico,* 1ere partie, mss 71, doc. 32.

[170] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.194.

[171] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, p.196.

[172] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal: a encomenda régia entre o moderno e o romano*, (texto policopiado), tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências Socais e Humanas, Universidade Nova, Lisboa, 1991, p.415.

l'architecte : « João de Castilho, je affirme à V. A., il est à édifier le monde, et que ce n'est pas croyable le travail qu'il abat ».[173]

Castilho est pleinement conscient de ses capacités pour mener à bien le projet de Ravena puisqu'il affirme, en janvier 1542, que les Turcs pouvaient bien venir mais que la forteresse leur résistera : « L'ouvrage est déjà tel que je ne dis pas « que le chérif vienne » mais le Turc, avec toute sa puissance, qu'il ne pourra nous mettre à mal ». Et d'ajouter que « cet ouvrage est très grand et très puissant », selon ce qu'il dit dans une autre lettre à Dom João III, datée de juillet 1542, dans laquelle il fait état de plus de 100 hommes rien que pour réaliser une fondation de la forteresse.[174]

Un autre de ses ouvrages les plus connus est la chapelle Nossa Senhora da Conceição, située à Tomar à proximité du couvent du Christ, et qui était destinée à devenir un mausolée royal.

Commencé vers 1535, le chantier de la chapelle ne sera achevé qu'en 1573. On l'attribue à Castilho, mais sa construction a probablement été poursuivie par Diogo de Torralva qui dirigeait des travaux du couvent du Christ de Tomar.

Il est étrange que João de Castilho ait abandonné la technique des voûtes à nervures. Peut-être était-ce une exigence de Dom João III, qui construisait là la chapelle où il serait inhumé. Les voûtes ont ici été exécutées en pierre de taille selon une technique de la Renaissance. Les voûtes, en berceau et en coupole, sont composées de caissons. On remarque encore la présence d'arcs doubleaux dans la nef et d'ogives dans la coupole. Le chœur présente une voûte en cul-de-four (annexe PT-Sa8).

Cette chapelle est évoquée dans la lettre de Frei António de Lisboa, lequel énumère les mérites dont João de Castilho a fait preuve à l'occasion de la construction du couvent du Christ, et citant les ouvrages qu'il a fait construire : « il a fait aussi l'ermitage de Conceição qu'on voit de l'Hôtellerie et de l'infirmerie de ce couvent, ouvrage notable et remarquable dans un si petit espace et si parfait que les architectes n'ont qu'une seule chose à redire c'est qu'il n'est pas terminé faute de temps, qui est voleur tant des imperfections et des chagrins que des perfections et des joies, mais dans la vie l'une et l'autre chose ont une fin ». [175]

[173] MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal: a encomenda régia entre o moderno e o romano*, (texto policopiado), tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências Socais e Humanas, Universidade Nova, Lisboa, 1991, p.491.

[174] VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, Vol.I, Lisboa, Imprensa Nacional, 1899, pp.195-196. ANTT, *Corpo Chronologico,* 1ere partie, mss 71, doc. 52.

[175] COELHO, Maria da Conceição Pires, *Contributo de João de Castilho para a génese da arquitectura do Renascimento em Portugal*, Livraria Minerva, Coimbra, 1987, p. 376, fait référence à un document conservé aux archives de Torre do Tombo, référence : ANTT, *Ordem de Cristo. Conventos Diversos*, B-51-34, nº 796, fls. 5.

Conclusions

Le contexte historique et culturel du Manuélin était propice à la réalisation de grands ouvrages. Des conditions privilégiées étaient réunies pour permettre un essor de la construction à l'époque des Grandes Découvertes : disponibilité de main-d'œuvre portugaise et étrangère ; prospérité économique permettant de payer les ouvriers et les artistes, et d'acheter les matériaux et les autres ressources. Des étrangers vinrent ainsi travailler sur les chantiers du Portugal dont la plupart étaient des espagnols originaires de la région natale de João de Castilho. Les ouvrages de l'architecture manuéline furent érigés comme autant de monuments à la gloire des monarques et du pays.

Le Portugal était très en avance à l'époque, comme l'atteste la première traduction du traité de Vitruve en Europe (après l'Italie), entre 1537-1541, qui a été réalisée par Pedro Nunes pour le roi Dom João III. De nombreux manuscrits et traités d'architecture circulaient également au Portugal : Leon Battista Alberti, *De Re aedificatoria*, 1485 ; Luca Pacioli, *Somma de aritmética, geometria, proporzioni e proporzionalitá*, 1494 ; *De Architectura*, de Vitruve, avec plusieurs éditions dès 1513 ; *Medidas del Romano*, premier tome, de Diego de Sagredo, 1526 ; *Regole Generali di Architectura*, le livre IV, Sebastiano Serlio, 1537 ; *I Dieci Libri de l'Architectura*, d'Alberti, 1547.

L'esprit de la Renaissance arrivait au Portugal et Castilho a su en appliquer les principes géométriques et les formes aux techniques des voûtes à nervures.

Le parcours de l'architecte João de Castilho au Portugal se caractérise par son engagement permanent dans les grands chantiers de son époque. Il a d'abord travaillé pour le roi Dom Manuel, qui a donné son nom au style architectural manuélin, et après le décès de celui-ci, il a continué à servir la couronne en travaillant pour le nouveau monarque, Dom João III. Des documents indiquent, à partir de 1528, que Dom João III appelle Castilho le « maître de ses travaux » (*mestre de minhas obras)*, désignation qui est réutilisée au moins vingt années plus tard en 1545.

La bibliographie actuellement disponible attribue un grand nombre d'ouvrages à João de Castilho, soit parce que ceux-ci sont directement documentés, soit par recoupement des faits ou par comparaison de l'architecture. Nous abordons la comparaison architecturale dans notre dernier chapitre, en nous basant sur les relevés que nous avons effectués. Dans le présent chapitre, nous nous penchons avant tout sur l'analyse des sources documentaires afin de tenter d'établir la justesse et la véracité de ces documents, notamment ceux qui portent sur nos cas d'études.

Les ouvrages étudiés et les documents d'époque qui nous sont parvenus démontrent que João de Castilho a été maître de travaux à la cathédrale de Braga, à l'église de Vila do Conde, aux monastères de Jerónimos à Lisbonne, d'Alcobaça et de Batalha et au couvent du Christ à Tomar.

On trouve à la cathédrale de Braga une inscription qui date le chœur de 1509. Un écrit concernant Vila do Conde qualifie João de Castilho de « maître de la grande chapelle (c.-à-d. du chœur) de

Braga ». Le *Memorial* de l'évêque qualifie le chœur de « première chapelle à voûte à combados (…) qui fut faite au Portugal jusqu'à cette époque ».

En 1511, Castilho signe le contrat pour la construction des nefs, des arcs et de la porte principale de l'église matrice São João Baptista à Vila do Conde. Il n'y est cependant fait aucune mention des voûtes de l'église dont la paternité reste sujette à caution. Nous remarquons que le projet initial, qui était prévu sur plan carré, ne correspond pas au plan actuel : « Il y aura une chapelle voûtée, de la largeur de la nef du milieu, et aussi longue que large ».

Pour Alcobaça, une lettre du roi Dom Manuel de 1519 recommande que quelques chantiers soient suspendus : « (…) et qu'on n'en fasse maintenant pas d'autres, si ce n'est ceux que Ioham de Castilho doit faire, la sacristie et la librairie conformément à ce à quoi il est obligé par contrat ».

Pour Batalha, Dom João III, dans une lettre de 1528, écrit : « moi, faisant confiance à Jº de Castyllo, maître de mes ouvrages (…) je le nomme dorénavant maître d'œuvre du monastère de Batalha », sans toutefois préciser l'ouvrage dont il s'agit. On attribue habituellement à Castilho la voûte du déambulatoire.

Pour le couvent du Christ de Tomar, plusieurs documents nous sont parvenus. Concernant la première phase des travaux commandés par le roi Dom Manuel, Dom João III écrit dans une lettre que Castilho a fait « la tribune, le chapitre, le grand arc de l'église, la porte principale ». La porte est datée de 1515, selon une inscription apposée à coté de sa signature. La deuxième phase des travaux, qui visait la plus grande partie du monument, est quant à elle abondamment documentée : lettre expliquant le choix du plan de Castilho dans le cadre du concours d'idées ; contrat de 1533 pour l'exécution du cloître principal (postérieurement démoli et remplacé par le cloître actuel de Diogo Torralva) ; lettres de Castilho adressées au roi, que ce soit pour envoyer des plans, décrire l'avancement des travaux ou pour lui demander de lui fournir ce qu'il lui manque pour achever les travaux (réfectoire, salle du chapitre, inachevée par ordre du roi, toute la partie du couvent, cinq cloîtres (cloître principal, cloître de Micha, cloître de Corvos, cloître hospitalier et cloître de Santa Bárbara) étude des collégiales, dortoir des religieux, cellule du Prieur, maison des novices et cuisine.

Pour Jerónimos, il subsiste des archives des chantiers qui prouvent que des paiements ont été faits en faveur de Castilho en 1516, lorsque que Boitaca (l'architecte du roi avant lui) dirigeait les travaux. Et entre 1517 à 1519, on sait que « João de Castylho maître d'œuvre du cloître premier et du chapitre, de la sacristie et du portail latéral doit apporter cent dix ouvriers et doit recevoir par mois cent et quarante mille réaux ». Ces travaux étaient répartis entre ses ouvriers, divisés en groupes, comme des sous-traitants. Un document de 1522 évoque sa responsabilité pour le transept. Dom João III écrit : « qu'on remette à João de Castyllo, maître d'œuvre de Bellem, mil cruzados en paiement partiel de l'entreprise, qui à nouveau avec lui est faite sur la réalisation des voûtes et piliers de la croisée de l'église de Bellem ».

Malgré ces informations, certains auteurs continuent à attribuer le projet à Boitaca et l'exécution des travaux à João de Castilho. Castilho fut l'architecte du roi après Diogo Boitaca et la paternité des ouvrages n'est pas toujours très claire entre ces deux architectes. Mais les sources présentées par les auteurs partisans de Boitaca, outre les feuilles de paie de 1514 qui le désignent comme « maître », sont des chroniques tardives et des analyses architecturales qui ne nous semblent pas correctes au regard de l'analyse architecturale des voûtes.

Nous sommes d'avis que, pour Jerónimos, les documents disponibles sont majoritairement favorables à une attribution du projet et de la construction à João de Castilho. Outre les dossiers des travaux, nous pouvons également citer la lettre dans laquelle le roi Dom João III cite les ouvrages exécutés par Castilho et où il écrit *a obra* (l'ouvrage, le chantier dans sa globalité) du monastère de Jerónimos de Belém, alors que, pour d'autres édifices, le roi désigne spécifiquement les parties d'édifices que Castilho a construites en tant que *mestre*. Cela tend à indiquer que Castilho était chargé de l'ensemble des travaux. Tous les documents auxquels nous faisons référence sont des sources originales contemporaines et nous sommes d'avis que leur crédibilité est supérieure à celles de chroniques plus tardives, comme par exemple le manuscrit de Frei Jacinto de São Miguel (1692-1761, *circa*), document sur lequel se fondent souvent certains auteurs pour attribuer l'église de Jerónimos à Boitaca.

Nous voulons aussi mettre en lumière le double rôle exercé par João de Castilho, à la fois architecte et entrepreneur. Il établissait les projets, comme le prouvent les plans documentés de Tomar, et il exécutait les travaux, parfois dans le cadre de projets d'un autre architecte, comme par exemple la forteresse de Mazagão dont le projet était de Benedetto di Ravena.

Par ailleurs, Atanázio a émis des interprétations architecturales qui mettent en évidence le caractère tardif du projet des voûtes, ce que nous avons confirmé par notre relevé d'architecture de 1995.

Les autres attributions à João de Castilho se basent surtout sur des recoupements de rapports entre personnes ou sur des analyses de l'architecture.

Soulignons, car cela a son importance, qu'il existe une ressemblance formelle entre la nef de Jerónimos et celles des églises de Freixo de Espada-à-Cinta et d'Arronches, dans lesquelles les trois nefs sont recouvertes par une seule voûte en berceau. Il convient d'ajouter à cette trilogie la voûte des nefs de la cathédrale de Viseu et de l'église de Moncorvo. Ces deux voûtes présentent le même type de forme arrondie traversant les trois nefs. Signalons au passage que la voûte de Moncorvo est largement ignorée par les auteurs portugais, et absente des bibliographies.

Les attributions des voûtes de la cathédrale de Viseu et de l'église du monastère de Vilar de Frades s'expliquent par la proximité et les rapports avec la ville de Braga, notamment à travers son évêque Dom Diogo de Sousa, lequel a financé les travaux de la croisée de Vilar de Frades et entretenait des rapports avec l'évêque de Viseu,

Dom Diogo Ortriz de Vilhena. Pour Vilar de Frades, on ne trouve aucune référence à Castilho et pour Viseu, on ne dispose que de documents faisant état d'ouvriers biscaïens, et d'un certain Castilho sans qu'on sache exactement de qui il s'agit.

Le cas du couvent de Jésus de Setúbal est très polémique. À l'instar de la voûte de Belém, l'attribution de la voûte du chœur divise les auteurs, entre Boitaca d'après des chroniques, et Castilho selon les analyses d'architecture et le fait que Castilho se soit rendu à Setúbal vers 1507 ou 1508 avec Alonso Rodriguez dans le cadre d'un achat de pierres destinées à la cathédrale de Séville.

La construction tardive de la porte, qui n'est pas alignée avec l'intérieur de la nef, nous pousse à penser que les voûtes de la nef et du chœur ont été exécutées plus tardivement. Il n'était en effet pas rare à l'époque de modifier le projet des voûtes même après que leurs murs porteurs soient achevés. Par exemple à Tomar, Castilho avait déjà terminé la voûte du cloître principal lorsque le roi ordonna de démolir celle-ci (qu'il fit remplacer suivant un projet de Torralva). La même chose a pu se produire à Vila do Conde. Tout porte à croire que, même si Boitaca a pu être l'auteur d'un plan initial pour Setúbal et le monastère de Jerónimos, les voûtes pourraient être postérieures et avoir été dessinées par João de Castilho. Telle est notre interprétation des sources historiques disponibles.

Des informations relatives à l'église de Setúbal nous retiendrons que l'évêque Dom Diogo Ortriz a béni la première pierre du couvent, dont fait partie l'église. Il était à l'époque évêque de Ceuta et sera nommé plus tard évêque de Viseu. C'est lui qui a commandé les travaux de la nef et du narthex de cette cathédrale. Nous émettons une nouvelle hypothèse que Castilho se serait rendu au nord du Portugal à la demande de cet évêque.

Outre la question de l'attribution des voûtes, voyons ce que les documents peuvent nous apprendre en matière architecturale.

À Tomar, il a d'abord établi des plans pour le concours et ensuite, pour les travaux, des plans détaillés qui indiquent la forme des arcs. Aucun plan des voûtes ne nous est parvenu, mais il existe une description détaillée des voûtes dans le contrat du marché du cloître principal, description que nous donnons ci-dessous. Ce cloître n'existe malheureusement plus, ce qui nous aurait permis de confirmer nos interprétations sur la question des voûtes :

- des voûtes sur croisées d'ogives (seulement les arcs) en berceau en plein cintre ;

- « lesquels bougeront des consoles comme ils sont disposés sur le dessin ». Nous pensons qu'il s'agit d'un dessin en élévation vu que pour exécuter le plan il ne faut pas numéroter le mouvement des arcs, le plan seul suffit.

- les consoles auront des cimaises, où les arcs bougent, localisées au-dessus du centre des arcs (les arcs sont surbaissés).

Le document décrit que les voûtes sont des « croisées à la romaine ». Au chapitre suivant, nous expliquons ce type de voûte, caractéristique du couvent de Christ, des voûtes en réseaux.

Nous avons vu que des traités d'architecture existaient au Portugal,

pays qui était très avancé en ce qui concerne les nouvelles formules de la Renaissance. On trouvait des livres d'Alberti depuis 1485, de Vitruve depuis 1488 (Vitruve fut traduit en portugais dès 1537-41, avant tout autre pays européen), de Diego de Sagredo en 1526, de Sebastiano Serlio en 1537.

Abstraction faite du débat concernant l'attribution des projets, toutes les sources documentaires montrent que João de Castilho avait une formidable capacité de travail et que son activité fut intense jusqu'à sa mort à Tomar, probablement octogénaire. Il est également permis de penser qu'une partie de son œuvre nous est encore inconnue, comme l'indique la même lettre de Dom João III, que nous avons citée, « certains par contrats et d'autres sans eux ». Il coordonnait plusieurs équipes en sous-traitance, ce qui lui permettait de voyager et de gérer plusieurs chantiers à la fois, comme le faisaient d'autres architectes en Europe. Pour bien comprendre ce point, nous concluons ce chapitre par une liste chronologique des faits historiques les plus importants que nous avons analysés, pour mieux appréhender et résumer l'évolution et l'ampleur de l'œuvre de João de Castilho.

1470-1480, *circa* – Naissance de João de Castilho, dans la région de Cantabrie, Espagne.

1487-1495, *circa* – João de Castilho travaille avec Simón de Colonia à la cathédrale de Burgos.

1495-1508, *circa* – João de Castilho travaille avec Alonso Rodriguez à la cathédrale de Séville.

1508-1509, *circa* – João de Castilho se rend à Setúbal avec Alonso Rodriguez pour acheter de la pierre pour le dallage de la cathédrale de Séville. Éventuelle intervention au couvent de Jésus.

1509 – João de Castilho est maître d'œuvre des travaux de la cathédrale de Braga.

1509 -1511 – Date probable de son intervention au monastère de Vilar de Frades.

1511 -1513 – Date probable de son intervention à la cathédrale de Viseu.

1511 - 1513 – João de Castilho est chargé des travaux de l'église de Vila do Conde.

1513, *circa* – Date probable du projet de l'église de Freixo de Espada-à-Cinta.

1515 – João de Castilho est maître d'œuvre au couvent du Christ, à Tomar. Il remplace Diogo de Arruda, qui est en Afrique du nord. Il construit la tribune, le chapitre, le grand arc de l'église, la porte principale, qu'il signe et date.

1516, avril - Pour la première fois, son nom figure dans la liste des paiements des travaux du monastère de Jerónimos, à Belém, dirigés alors par Boitaca. Les murs extérieurs étaient au niveau des cimaises.

1517- Il est nommé maître entrepreneur (*mestre empreiteiro*) pour le cloître, la salle du chapitre, la sacristie et la porte sud du monastère

de Jerónimos.

1518- Il retourne à Tomar en septembre.

1519 – João de Castilho est maître d'œuvre des travaux du monastère d'Alcobaça. En juillet, Castilho commence les travaux de la sacristie et de la bibliothèque.

1519 – Fin août, João de Castilho retourne à Belém. À cette date étaient terminés : les deux portes de l'église, la sacristie, le réfectoire et le premier étage du cloître. Les travaux de l'étage du cloître et des piliers de l'église étaient en cours.

1519 – João de Castilho fait construire, sur un terrain contigu à la carrière, un abri pour les ouvriers qui taillent les pierres destinées au couvent du Christ.

1521-1523 – Contrat pour la nouvelle Maison du chapitre du couvent du Christ au sud du nouveau portail de l'église, qui reste inachevée.

1520 – Début de construction du cloître supérieur d'Alcobaça.

1521 – Traduction de Vitruve en italien, par Cesario Cesariano,.

1522 – Contrat du roi Dom João III avec João de Castilho pour les travaux des piliers et du voûtement de la croisee de l'église du monastère de Jerónimos, Lisbonne.

1525 – Concession d'une rente à João de Castilho pour les services qu'il a rendus à Belém, ce qui indique que ses travaux étaient achevés à cet endroit.

1526 – Publication de *Medidas del Romano*, premier tome, de Diego de Sagredo.

1528 – João de Castilho est maître d'œuvre du monastère de Batalha. Date des dernières preuves de paiements pour des travaux effectués au monastère d'Alcobaça.

1529 – Départ de João de Castilho avec le capitaine Duarte Coelho vers les places d'Afrique du nord, en vue d'inspecter des ouvrages.

1530 – Commande du roi à João de Castilho pour de nouveaux travaux au couvent du Christ.

1531-32 – Édification du cloître Santa Bárbara (Tomar).

1532 – Ordination des 12 premiers novices du nouvel Ordre du Christ, par Frei António de Lisboa. Le plan du nouveau couvent de Tomar est peut-être déjà prêt.

1533 – Contrat du marché pour les travaux du couvent du Christ. João de Castilho reste 6 mois à la cour d'Évora et discute du projet avec Bartolomeu de Paiva, pourvoyeur des travaux royaux. Date inscrite sur un tas de charge de la voûte de l'étage inférieur de la Maison du Chapitre.

1535-36 – Facture des chaires du refectoire de Tomar.

1536 – Visite du roi Dom João III au chantier de Tomar.

1540 – Suspension des travaux de la salle du chapitre par ordre de Dom João III.

1541 – Traduction de Vitruve en portugais, par Pedro Nunes.

1541-1542 – Construction de la forteresse de Mazagão, en Afrique du nord sur un projet de Benedetto da Ravenna. Mise à l'arrêt des travaux de Tomar.

1541-42/50 – Construction du cloître de Micha, à Tomar.

1543 – Achèvement du cloître hospitalier de Tomar.

1543-44 – Achèvement du troisième niveau de l'aile occidentale du cloître hospitalier de Tomar.

1543-46 – Construction du cloître de Corvos de Tomar.

1547, *circa* – João de Castilho fait le projet de l'ermitage de Nossa Senhora da Conceição, proche du couvent, dans lequel sera construit le pantheon du roi Dom João III.

1548 – Le nouveau couvent du Christ est achevé. Emménagement des religieux. João de Castilho fait le projet du Noviciat (*Salas das Cortes*).

1550-52 – Construction des salles et de l'oratoire du noviciat, Tomar.

1552, *circa* – Mort de João de Castilho.

2. VOÛTES À NERVURES GOTHIQUES

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit le Portugal comme un creuset d'échange, où circulaient des ouvriers et des architectes, et des traités et manuscrits de toute l'Europe.

Les méthodes de tracé et de construction de voûtes étaient ainsi diffusées par cette circulation des savoirs et des personnes qui travaillaient sur plusieurs chantiers à l'époque ; telle est notre hypothèse de travail. Les sources écrites et iconographiques sont toutefois très rares, surtout dans notre contexte. Nous manquons d'exemples comparables au croquis que Dürer a fait à Venise, représentant des voûtes à nervures courbes [176] (Figure 6). En l'occurrence, celles-ci pourraient être aussi bien espagnoles qu'allemandes, suggérant que différents types de voûtes pourraient être diffusés par d'autres artistes que les architectes.

Cependant, les voûtes témoignent par elles-mêmes. En effet, chaque pays possède des caractéristiques particulières tant pour les typologies que pour les méthodes de tracé. Dans une première partie de ce chapitre, nous faisons un état de la question, abordant les sources historiques et bibliographiques relatives aux tracés et à la construction des voûtes dans une large perspective comparative qui nous permettra, nous l'espérons, de situer plus précisément les voûtes portugaises dans le contexte de l'époque. Dans une deuxième partie, pour le Portugal, nous étudions et nous classons les différents types de voûtes que nous avons analysées sur place, afin de distinguer et de situer les voûtes de João de Castilho par rapport à l'œuvre de ses contemporains. Cette « lecture » n'a jusqu'ici pas été abordée de façon systématique. L'état d'avancement des études est en effet assez différent d'un pays à l'autre.

Contrairement au Portugal, la France, l'Angleterre, l'Europe Centrale et l'Espagne, possèdent une série de documents historiques et bibliographies sur les voûtes nervurées, notamment en ce qui concerne le tracé et la construction.

Aux 15ème et 16ème siècles, des manuscrits et des traités d'architecture commencent à faire leur apparition surtout dans les pays d'Europe centrale. La bibliographie allemande est ainsi particulièrement riche à cet égard.

Au 19ème siècle, le néo-gothique et le rétablissement de certains monuments anciens ont apporté d'importantes contributions concernant l'architecture gothique. Les auteurs de références sont Violet Le Duc (1814-1879) en France, et Robert Willis (1800-1875) en Angleterre.

Du 20ème siècle à nos jours, des manuscrits ont été traduits et interprétés. L'Espagne mène toute une série de recherches et enrichit la bibliographie à ce sujet, notamment à travers la traduction en

[176] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in *La Piedra Postera.* Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, p. 231.

espagnol d'ouvrages anglais et allemands[177]. Ces recherches sont consacrées au tracé et à la construction des voûtes espagnoles, ainsi qu'aux influences artistiques étrangères, notamment à la présence d'architectes d'Europe centrale en Espagne dès la fin du 15ème siècle.

En 2013, Palacios Gonzalo de l'Université Polytechnique de Madrid a publié un site Internet sur les voûtes à nervures gothiques[178]. Plusieurs pays y sont représentés, notamment la France, l'Angleterre, l'Allemagne et l'Espagne. Ce site présente un précieux inventaire photographique de voûtes, classées chronologiquement et par périodes du gothique dans chaque pays.

Cet inventaire nous a permis de consulter un très grand nombre de voûtes étrangères, principalement espagnoles, en plus de celles que nous avons pu visiter. Le classement par ordre chronologique nous a permis de comprendre l'évolution des typologies en chaque pays.

Nous nous penchons en particulier sur trois pays, dans lesquels nous identifions des similitudes morphologiques et des rapports historiques avec les voûtes de João de Castilho : l'Espagne, son pays d'origine où il s'est formé et d'où il a apporté le type des voûtes à *combados* ; l'Allemagne, qui a influencé le gothique tardif espagnol à travers l'introduction des nervures courbes et par ses églises-halles ; l'Angleterre, de par la similitude structurelle des voûtes en éventail avec la voûte de la nef de Jerónimos.

[177] Ces traductions sont soutenues par la Sociedade Española de Historia de la Construcción, de Robert Willis, Ungewwitter, Jacques Heyman, et autres auteurs.
[178] www.bovedasgoticasdecruceria.com

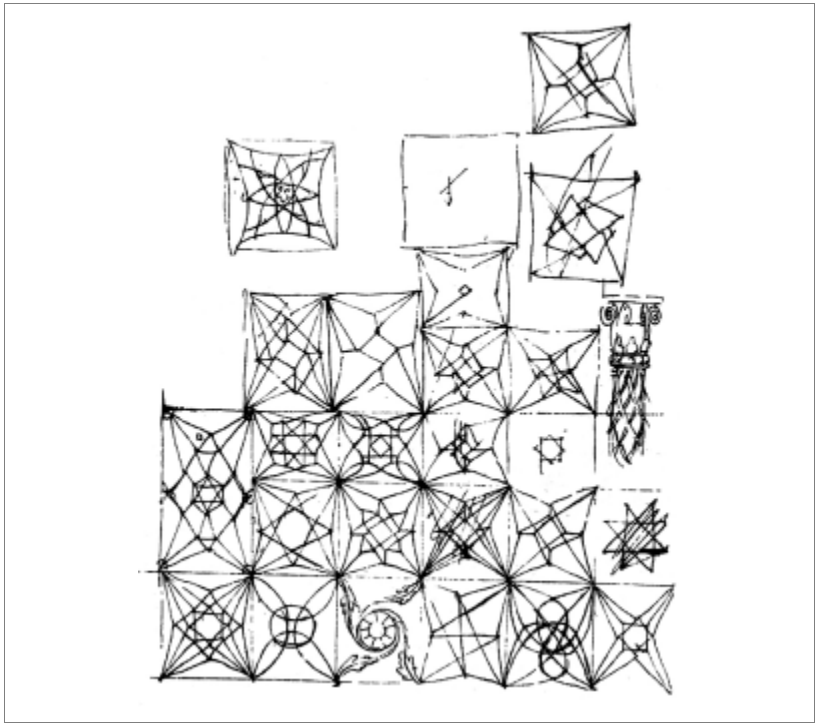


Figure 6. Croquis de Dürer (Nussbaum, 2007).

Nous présentons dans l'annexe le relevé photographique des voûtes des édifices que nous avons visités, identifiés par FR pour la France, GB pour l'Angleterre, DE pour l'Allemagne, ES pour l'Espagne. Le Portugal est identifié par région.

La lacune des documents (plans) de l'époque et d'études à ce sujet

au Portugal ne nous permet pas d'analyser les tracés, comme nous ferons pour le cas de l'Europe.

Nous avons cherché à visiter les ouvrages religieux et monastiques construits pendant la période d'activité de João de Castilho au Portugal (1509-1552). Cependant, afin de brosser un panorama plus large du contexte manuélin, nous avons aussi analysé des voûtes antérieures et postérieures qui se trouvaient dans les monuments à l'étude.

De la période antérieure sont reprises les voûtes d'ogives. De la période postérieure sont reprises les voûtes Renaissance, plus bombées, principalement celles des églises-halles, qui relèvent du cadre de notre étude. Nos Annexes reprennent la liste des édifices que nous avons visités et le classement de leurs voûtes par typologie.

Nous insistons à nouveau sur ce point : il ne s'agit pas d'un inventaire exhaustif, mais d'une étude élargie de cas représentatifs des voûtes manuélines qui vise prioritairement à situer plus précisément celles-ci dans le contexte européen et à distinguer de manière plus probante les caractéristiques de celles qui sont attribuées à Joao de Castilho.

L'objectif que nous poursuivons est en effet de caractériser les voûtes de João de Castilho par rapport à l'œuvre de ses contemporains et de rechercher d'autres voûtes comparables au berceau de l'église-halle de Jerónimos de manière à confirmer son originalité.

L'analyse des voûtes portugaises et leur mise en comparaison avec les autres voûtes européennes suppose de recourir à une typologie de voûtes utilisable pour tous les pays abordés. Parmi les possibilités qui se présentaient à nous, nous avons opté pour la typologie que nous avons jugé la plus pertinente pour notre objet d'étude, c'est-à-dire un classement par type de nervure.

Habituellement, les classements des voûtes nervurées - par exemple en voûte *en étoile* et en voûtes *réticulées* - ne précisent pas quel est le type de nervure du point de vue de leur morphologie ou de leur composition géométrique. La forme *en étoile* peut en effet être obtenue aussi bien avec des tiercerons qu'avec des liernes. D'autre part, la voûte *réticulée* peut être obtenue en utilisant des ogives, des tiercerons ou des liernes. Or, nous pensons que si l'on ne comprend pas la typologie des nervures, nous entendons par là leur fonction structurelle, dans l'ossature de la voûte, il n'est *a fortiori* pas possible de comprendre le fonctionnement intime de la voûte, son essence même.

Ainsi, nous classerons les voûtes par type de nervures d'abord et ensuite par forme des nervures. Par exemple, voûte *à tiercerons* en étoile, voûte *à liernes* en étoile. Ce point est essentiel car il nous permet d'associer la typologie d'une voûte à la typologie des nervures. Nous verrons par exemple que les nervures secondaires – les liernes et les *combados* – jouent souvent un rôle essentiel dans la forme de la voûte, surtout dans les voûtes manuélines, et en particulier celles de Castilho. Ces considérations nous permettent également de distinguer, par exemple, des voûtes très voisines sur le plan morphologique.

Un autre critère important du classement consiste à séparer le plan et l'élévation de la voûte. Nous avons d'abord essayé de trouver une typologie qui tiendrait compte à la fois des données du plan et de l'élévation, mais nous avons vu que ce serait impossible. On réalise facilement qu'une nervure en plan peut produire plusieurs formes en élévation : arc brisé, arc de cercle, ovale, horizontal etc. Ainsi, nous avons opté pour deux critères séparés : la typologie en plan et la typologie en élévation. Cette distinction est très importante dans le cadre de la présente thèse. On parvient à identifier João de Castilho dans le plan et surtout dans l'élévation.

2.2 Tracé et construction – État de la question

2.2.1 *Plan et élévation*

Avant de présenter les diverses méthodes de tracé des voûtes à nervures gothiques, qui est le principal objet de ce chapitre, nous analysons les méthodes gothiques de dessin et de construction, en particulier le rapport entre eux, telles qu'elles nous sont actuellement connues pour l'âge classique du gothique, les 13ème et 14ème siècles, dans le domaine royal français, son berceau principal.

Les gothiques ne disposaient apparemment pas de plan et d'élévation à différentes échelles, comme c'est le cas aujourd'hui pour transmettre les informations au constructeur. Les documents graphiques qui nous sont parvenus sont majoritairement des plans, qui n'indiquent pas les dimensions, mais qui peuvent parfois porter quelques indications écrites. L'élévation est nettement plus rare et la plupart des exemples qui nous sont parvenus [179] présentent des façades rendues de façon orthogonale avec des effets de perspective. Élaborée parfois avec force de détails sculptés, rendus de façon très soignée, l'élévation était considérée comme un moyen de communication destiné en premier lieu aux commanditaires.

C'était la géométrie qui permettait de : 1) déterminer et de dimensionner la forme générale de la construction ; 2) déterminer les proportions et les dimensions des éléments structurels ; 3) tracer les détails à l'échelle 1/1, à l'aide du compas et de l'équerre, sur le sol ou sur le mur : les moulures des portes et fenêtres, les bases et les chapiteaux des colonnes, les profils des nervures et les autres éléments de la construction ; 4) trouver l'emplacement de tous les éléments en chantier, à l'aide de cordes, en respectant la géométrie et les proportions préalablement déterminées (Figure 7).

[179] Voir les catalogues des collections très riches de Strasbourg, Ulm, Vienne, etc., établis par Johann Josef Böker, Architektur der Gotik - Gothic Architecture, Salzbourg-Munich 2005; BÖKER, Johann Josef, BREHM, Anne-Christine, HANSCHKLE, Julian, SAUVÉ, Jean-Sébastien, *Architektur der Gotik: Ulm und Donauraum* : ein Bestandskatalog der mittelalterlichen Architekturzeichnungen aus Ulm, Schwaben und dem Donaugebiet, Salzburg, Wien, Mury Salzmann, 2011 ; BÖKER, Joham Joseph, BREHM, Anne-Christine, HANSCHKLE, Julian, SAUVÉ, Jean-Sébastien, *Architektur der Gotik: Rheinlande. Ein Bestandkatalog der mittelalterlichen Architekturzeichnungen*, Salzburg 2013.

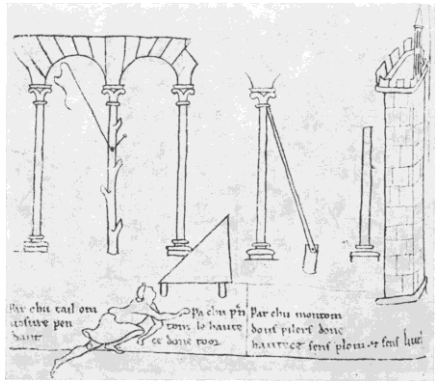


Figure 7.Villard de Honnecourt (Bechmann 1988)

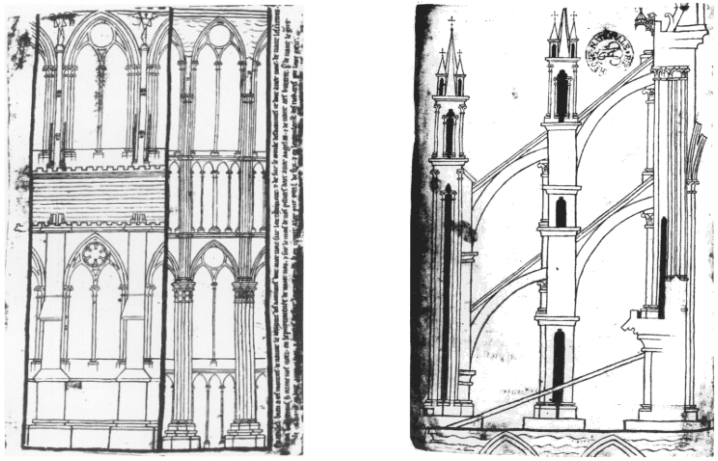


Figure 8. Élévations de Villard de Honnecourt.
Façades intérieure et extérieure de la cathédrale de Reims Ackerman,1997)

Figure 9. Élévation de la cathédrale de Reims.
Villard de Honnecourt (Ackerman,1997)

La représentation graphique de l'élévation et de la section à la Renaissance, a été analysée par James Ackerman dans un article devenu classique, notamment la représentation orthogonale, sujet pertinent pour notre étude. Auparavant, la section orthogonale ou en perspective n'était presque pas utilisée, même si certains dessins schématiques de Villard de Honnecourt s'en rapprochent : en particulier, l'élévation intérieure de la nef de la cathédrale de Reims, représentée à côté de l'élévation extérieure, présente une ébauche de départ de voûte en section, et la section du mur-gouttereau et des arcs-boutants du chevet (Figure 8 et Figure 9)[180]. En observant les dessins italiens de la Renaissance, l'auteur remarque qu'on ne faisait des sections que lorsqu'il y avait des problèmes de voûtes à résoudre. A cause de l'emploi de la perspective centrale (section en perspective), la méthode de dessin était centrifuge et partait du centre vers l'extérieur. C'est par exemple le cas de la section de Baldassare Peruzzi (1481-1536) de la croisée de Saint-Pierre du Vatican, qui met en scène l'intérieur de l'espace, vu à partir du centre (Figure 10).[181]

Quelques dimensions figurent dans ce dessin, mais le plus souvent la section était communiquée oralement, comme le prouvent les annotations que l'on retrouve sur les dessins de Peruzzi et d'Antonio da Sangallo le Jeune (1484-1546), précisant des détails comme

[180] ACKERMAN, James S., "Villard de Honnecourt's Drawings of Reims Cathedral: a study in architectural representation", in *Artibus et Historiae,* vol. 18, nº 35, 1997, pp. 41-49.
[181] ACKERMAN, James S., "Architectural Practice in the Italian Renaissance", in *Journal of Society of Architectural Historians,* vol. 18, nº 3, 1954, p. 9.

l'épaisseur des colonnes d'une façade, par exemple, ou bien comment il faudra situer le couvrement au-dessus des arcs et de l'entablement d'une nef d'église. Le premier témoigne un plan de Peruzzi du palais Massimi à Rome, qui est accompagné de textes expliquant la façade et l'épaisseur des colonnes. Le deuxième est un plan d'Antonio Sangallo, le Jeune (1484-1546), qui explique deux façons de voûter l'église : « On pouvait voûter cela de deux manières. La première, et aussi la moins coûteuse, est la suivante : la courbe (*sexto*) de la coupole est commencée au même niveau que l'imposte des grandes arcs et le dôme est construit comme une voûte de cloître (*vela*). La seconde manière consiste à faire une corniche au sommet des arcs en cercle parfait et par-dessus, à continuer en ligne droite de manière à pouvoir couper n'importe que genre d'ouverture, ou des fenêtres ou même des ronds. Et au-dessus desdites ouvertures, faites une autre corniche ronde à partir de laquelle vous pouvez bander la coupole ; mais d'abord allez tout droit (c'est à dire « continuez verticalement ») sur une distance valant 21/2 fois la projection de la corniche (une correction optique pour faire ressortir un plein hémisphère) ».[182] Dans une autre étude devenue classique, sur la cathédrale de Milan vers 1400, Ackerman a pu démontrer que des formules de proportionnement pourraient servir de « shorthand » (notes rapides) pour indiquer comment il

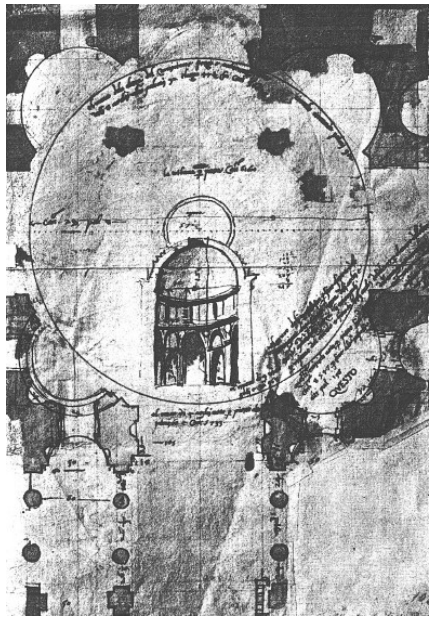


Figure 10. Baldassare Peruzzi, projet de Saint-Pierre du Vatican (Ackerman 1954)

fallait construire l'élévation à partir du plan[183].

Selon Wolfgang Lotz, c'est à la Renaissance, avec Alberti (1404-1472) qu'on commence à utiliser la représentation graphique orthogonale de la section. Alberti disait que la perspective et la représentation d'ombres était pour les peintres, et que l'architecte a

[182] ACKERMAN, James S., "Architectural Practice in the Italian Renaissance", in *Journal of Society of Architectural Historians,* vol. 18, nº 3, 1954, p. 11.

[183] ACKERMAN, James S., "Ars Sine Scientia Nihil Est' Gothic Theory of Architecture at the Cathedral of Milan," in *The Art Bulletin,* Vol. 31, No. 2, 1949, pp. 84-111.

besoin de dessins orthogonaux pour qu'on puisse y prendre les dimensions. Notons que la plupart des architectes italiens étaient formés dans des ateliers de peintres et sculpteurs. Lotz identifiait Antonio Sangallo de la deuxième décennie du 16ème siècle, comme le premier qui a suivi, dans ses plans, les indications d'Alberti, suivi de Baldasarre Peruzzi et d'Andrea Palladio (1508-1580). [184]

Le projet de chapelle de Sangallo (Figure 11) montre une section à projection orthogonale superposée au plan, suggérant la méthode actuelle de tracé, en tirant l'élévation à partir du plan. Ce dessin est dimensionné et on note qu'il intègre aussi des détails constructifs à gauche. Il révèle une manière de tracer le projet toujours utilisée actuellement et qui pouvait servir comme moyen de communication entre l'architecte et l'entrepreneur.

Comme aujourd'hui, le dessin jouait un rôle fondamental comme moyen de communication sur le chantier, à la Renaissance comme à l'apogée du gothique. Il ne s'agit pas des dessins survivants dans les collections, lesquels appartiennent en général à d'autres phases du processus de création: la phase de projet et la phase de communication avec le commanditaire.[185] Peu de témoins de cette catégorie particulière subsistent, puisque les dessins d'exécution étaient tracés par le maître d'œuvre à l'intention de son second, son

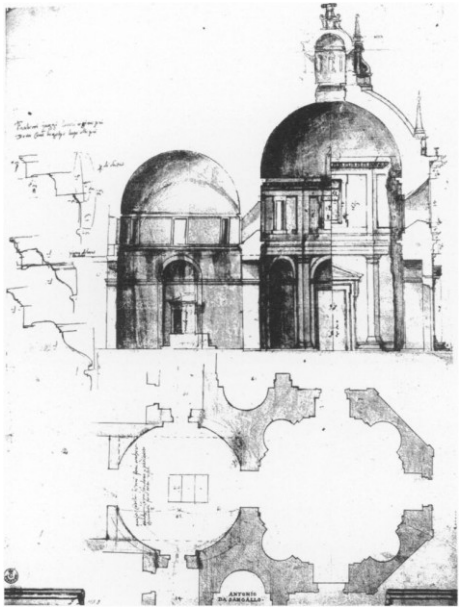


Figure 11. Antonio Sangallo représentation orthogonale d'une chapelle
(Ackerman 1997)

« appareilleur » ou Parler, ses entrepreneurs sous-traitants, et ses ouvriers, à échelle 1:1 sur le sol ou la paroi enduite de la « salle de traits ».[186] De Soissons à Trogir en Dalmatie, les graffitis prouvent

[184] ACKERMAN, James S., "Villard de Honnecourt's Drawings of Reims Cathedral: a study in architectural representation", in *Artibus et Historiae,* vol. 18, nº 35, 1997, p. 41.

[185] BUCHER, François, "Design in Gothic Architecture: A Preliminary Assessment", in *The Journal of the Society of Architectural Historians*, Vol. 27, Nº 1, 1968, pp.49-71.

[186] SHELBY, Lon R., "The role of the Master Mason in Medieval English building", in *Speuculum*, Vol. 39, nº 3, Medieval Academy of America, 1964, pp. 387-430.

qu'à l'occasion, l'ouvrage même pourrait servir de support.[187]. A cela s'ajoutaient les profils ou patrons, « molles » en parler picard de Villard de Honnecourt (voir Figure 12), en grandeur nature, qui servaient à la taille des pierres. Cette méthode de travail consistant à tracer les plans sur place était encore courante au 19ème siècle, et elle est toujours utilisée par les Compagnons de France sur les grands chantiers de restauration. Nous en avons des témoins à Jerónimos, sur le mur nord de la nef, dans la dernière travée avant le transept. Nous y identifions des éléments de la balustrade et du cloître supérieur, qui sont daté du 19ème siècle.

L'exemple de la cathédrale de Milan [188] montre comment la géométrie servait à déterminer les proportions, les dimensions générales de la construction. Le tracé de l'élévation de la cathédrale de Milan a connu plusieurs changements de plans, ce qui était courant à l'époque. Au départ, deux alternatives se présentaient : certains architectes utilisaient la méthode *ad quadratum* - dont Heinrich Parler de Prague – alors que d'autres préféraient la méthode *ad triangulum*. L'élévation de la nef pouvait ainsi s'inscrire dans un carré ou dans un triangle équilatéral. Plus tard, ces

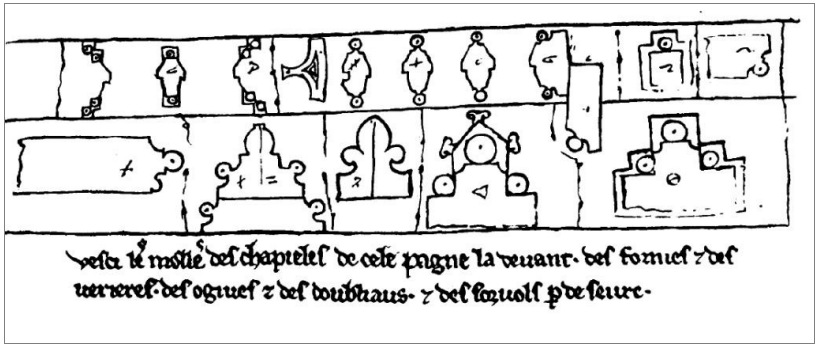


Figure 12. Villard de Honnecourt. Profils pour la cathédrale de Reims. (Shelby 1971)

proportions ont été abandonnées. Gabriel Stornaloco a conçu l'élévation à partir d'une grille qui correspondait aux proportions d'un triangle équilatéral et, en 1400, une hauteur moindre a été choisie, basée sur un triangle 3-4-5. [189]

Selon Robert Bork, la cathédrale de Strasbourg a fait l'objet d'une discussion similaire à celle de Milan. Il s'avère toutefois très difficile de déterminer, à partir des ouvrages réalisées, quels furent les principes qui ont guidé le dessin. Selon le cas, on a cru retrouver une section *ad triangulum*, d'autres proposent des triangles à 45º ou encore le rectangle d'or. Bork note l'incertitude que peuvent présenter ces études, à cause d'erreurs de relevé, d'altérations au

[187] BARNES, Carl F. Jr., "AmericaThe Gothic Architectural Engravings in the Cathedral of Soissons", in *Speculum, Vol. 47,* nº 1, Medieval Academy of America, 1972, pp. 60-64; BOLGIA, Claudia, "An Engraved Architectural Drawing at Santa Maria in Aracoeli, Rome", in *Journal of the Society of Architectural Historians*, Vol. 62, No. 4, University of California Press, Society of Architectural Historians, 2003, pp. 436-447.

[188] ACKERMAN, James S., "Ars Sine Scientia Nihil Est' Gothic Theory of Architecture at the Cathedral of Milan," in *The Art Bulletin,* Vol. 31, No. 2, 1949, pp. 84-111.

[189] BORK, Robert, *The geometry of creation: Architectural Drawings and the dynamics of Gothic design,* Farnham: Ashgate, 2011, pp. 4-5.

cours de la construction par rapport au dessin original, ou d'interprétations erronées (la largueur doit être prise à partir de l'intérieur, de l'extérieur ou de l'axe du mur ?)[190]

Il ne semble pas contestable que ces principes aient pourtant servi à la réalisation pratique puisque d'autres tracés - certains conservés en graffiti sur les murs - attestent que la géométrie était utilisée pour tracer des détails constructifs. Shelby analyse plusieurs représentations graphiques basées sur la manipulation du carré, la technique *de la quadrature*, pour le tracé des pignons et des pinacles.[191]

Les premiers traités allemands imprimés, de Mathias Roriczer, *Büchlein von der Fialen Gerechtigkeit* et *Geometrie deutsch*, datant de 1486-1489, expliquaient comment tracer des angles, des pentagones, des heptagones et des octogones, des carrés et des triangles, et comment trouver les distances et les centres de circonférences. Mathias Roriczer explique la méthode de tracer l'élévation du pinacle à partir de proportions carrées du plan (Figure 13).

La technique de Hanns Schmuttermayer pour dessiner l'élévation des pignons et pinacles est une construction géométrique similaire à celle de Roriczer se basant sur le carré. (Figure 14). La technique de la quadrature doit au moins dater de la fameuse génération des Parler

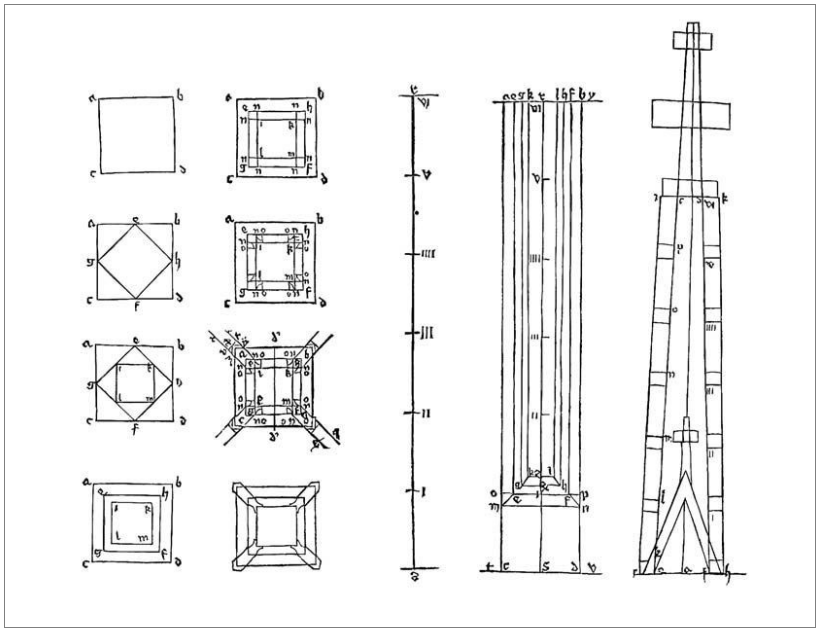


Figure 13. Méthode de tracé de Roriczer (Bork)

du 14ème siècle. Roriczer cite comme source de ses dessins la famille Parler de Prague. [192]

La géométrie a aussi été utilisée pour dimensionner et tracer les éléments structurels, comme le montre le traité « Unterweisungen »

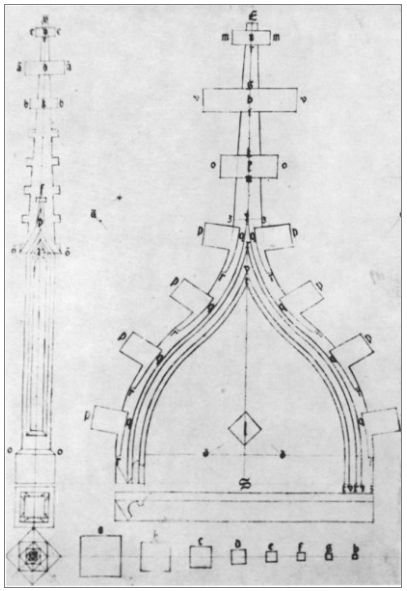
[190] BORK, Robert, *The geometry of creation: Architectural Drawings and the dynamics of Gothic design,* Farnham: Ashgate, 2011, p. 11.
[191] SHELBY, Lon R., "The Geometrical Knowledge of Medieval Master Masons", in *Speculum*, Vol. 47, nº 3, Medieval Academy of America, 1972, pp. 395-421.

[192] SHELBY, Lon R.,"Medieval Mason's Templates", in *Journal of Society of Architectural Historians,* vol. 30, nº 2, 1971, p. 154.

de Lorenz Lechler, architecte de la cour d'Heidelberg. Il inclut des tracés pour tailler les moulures des fenêtres, nervures, pignons, pinacles, bases et chapiteaux de colonnes et des contreforts. Lechler fait des recommandations pour tracer des éléments structurels en se basant sur des modules pris dans la largeur de la nef et l'épaisseur du mur. Le témoignage de Lechler a été recopié par Jacob Facht von Andernach à la fin du 16ème siècle, mais l'original date de 1516, et constitue donc un précieux témoin contemporain de notre Castilho. Lechler a voulu mettre ses connaissances par écrit, explique-t-il dans son manuscrit, afin que son fils puisse encore en profiter, ce qui est le signe évident d'une époque en pleine évolution.

Lechler a aussi utilisé la technique de la « quadrature », en se basant sur l'unité-module déterminée par l'épaisseur du mur du chœur. *S*on système consistait à multiplier des carrés inscrits les uns dans les autres sur un angle de 45º. Lechler explique la méthode : « Prenez la largeur du mur du chœur, qu'il soit petit ou grand, et tracez ensuite deux carrés se croisant mutuellement ; là [vous] trouverez tous les patrons dans un carré plus grand, juste comme vous les trouverez dessinés dans ce livre. Pour que vous puissiez comprendre plus facilement, je (les) ai dessinés pour vous dans le livre, à côté du texte. Ensuite, divisez l'épaisseur du mur du chœur en trois parties».[193] (Figure 15).

[193] SHELBY, Lon R.,"Medieval Mason's Templates", in *Journal of Society of Architectural Historians,* vol. 30, nº 2, 1971, p. 147.



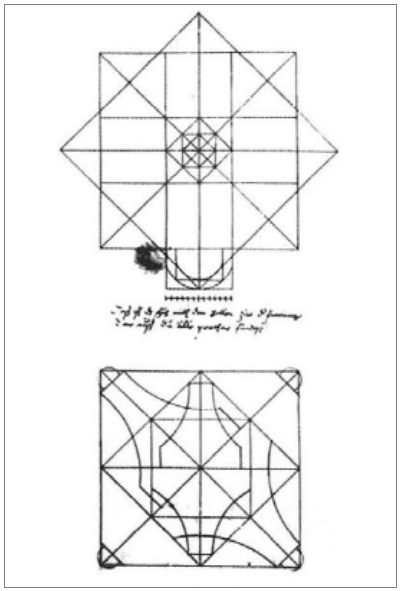


Figure 14. Tracé de Schmuttermayer (Shelby 1972)

Figure 15. Tracé de Lechler, Unterweisungen, fol. 42r (Huerta Fernández, 2012).

Le profil des nervures dépend de l'épaisseur du mur.[194] On dessine un carré de l'épaisseur du mur ; on trace un deuxième carré en

[194] HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "Technical challenges in the construction of gothic vaults: The gothic thoery of structural design", in: *Construction Techniques in the Age of Historicism. From Theories of Gothic Structures to Building Sites in the 19th Century*, U. Hassler, Ch. Rauhut y S. Huerta, eds. München: Hirmer, 2012, pp. 165-172.

losange et un carré central dans lequel on dessine la nervure ; dans ce carré, on trace un second carré à partir du milieu des côtés, dont la diagonale mesure le 1/3 de l'épaisseur du mur. La largeur de la nervure vaut la ½ de son épaisseur. La dimension obtenue pour la diagonale vaut le 1/3 de l'épaisseur du mur et 1/30ème de la portée. Les autres nervures sont obtenues à partir de la diagonale : la nervure transversale mesure 1/3 de la largeur de la diagonale et 1/22ème de la portée. Coenen a trouvé plusieurs églises avec ces dimensions.

Selon Lon Shelby et Robert Mark, les modules de Lechler étaient la largeur du chœur (le macro-module) et l'épaisseur du mur (micromodule). Analysons leurs explications des raisonnements de Lechler.[195]

Dans les églises-halles les nefs latérales servaient à contrebuter les nefs centrales.

La méthode pour tracer les chœurs consistait d'abord à attribuer les dimensions de base du plan et des élévations. La largeur du chœur recommandée par Lechler est de 20 ou 30 pieds. La longueur du chœur devrait être le double de sa largeur, et la nef devait être deux fois plus longue que le chœur. La largeur de la nef centrale est égale à la largeur du chœur. La largeur de la nef latérale est égale à la moitié de la nef centrale. La hauteur était également fonction de la largeur mais ses raisonnements ne sont pas clairs. Heidelberg était une fois et demie plus élevé que sa largeur de 20 pieds. Pour le chœur, une hauteur réalisable était deux fois sa largeur. L'épaisseur des murs et des colonnes est de 1 /10 par rapport à la largueur du chœur ou de la nef centrale.

Le texte sur Cologne reprend les mêmes proportions que celles d'Heidelberg. D'autres textes font un rapport entre la largeur du chœur et la hauteur à partir des tas de charge. Parfois la hauteur de la clef centrale est de 2 :1 ou 1 :5.

Un autre facteur que Lechler considérait était la qualité de la pierre ; il fallait ajouter ou enlever 3 pouces selon que la pierre était de bonne ou mauvaise qualité.

Les deux modules ont un rapport entre eux. La largeur du chœur (macro-module) permettait de tracer les murs, les colonnes et les contreforts extérieurs. Le micromodule servait à tracer des éléments constructifs, tel que le profil des nervures, comme nous l'avons vu.

Les auteurs suggèrent que Lechler voyait la nervure comme un élément structurel puisque son épaisseur varie avec la largeur de la portée, bien que ceci ne fût pas clair puisque Lechler dit aussi que la diagonale pourrait être plus petite.

Lechler ne dit rien sur les voûtains, mais il donne encore une recommandation structurelle de charger les contreforts au-dessus pour éviter le déversement de la construction.

[195] SHELBY, Lon R., MARK Robert, "Late Gothic structural design in the "Instructions" of Lorenz Lechler", in *Architectura*, Vol. 9, nº 2, 1979, pp. 113-131.

2.2.2 *Le tracé des voûtes*

Le tracé et la construction des voûtes anglaises et françaises ont été largement décrits par Robert Willis et Viollet Le Duc, nos principales sources[196]. La bibliographie française est plus fournie qu'en Angleterre et très importante, au point que Willis n'hésite pas à reprendre la terminologie française. Il appelle ainsi *lierne vaults* les voûtes polynervurées.[197]

Le gothique en France est subdivisé en trois périodes distinctes : gothique primaire (12ème sc.), gothique rayonnant (13ème siècle) et gothique flamboyant (14ème>15ème sc.). Cependant, la France a conservé la voûte d'ogives traditionnelle jusqu'aux derniers moments du Gothique.

On distingue en France deux aires distinctes, avec deux formes de voûtes : à l'ouest, dans le territoire des Plantagenêt - comtés d'Anjou et d'Aquitaine - les voûtes sont de forme cupulaires, très bombées, les clefs des ogives sont beaucoup plus élevées que celles des nefs latérales ; à l'est, dans les domaines du royaume de France, Île de France, autour de la région de Paris, la ligne de faîte est horizontale, avec une même hauteur de clefs. Les premières (angevines et aquitaines) sont divisées par travées, facteur de discontinuité de l'espace intérieur. Les voûtes du royaume français présentent des travées continues parfois renforcées par une nervure longitudinale. Les voûtes angevines utilisent un remplissage *à la française* (rangées parallèles aux murs), alors que les aquitaines sont concentriques, comme en Angleterre, avec des nervures plus épaisses. Malgré la forme cupulaires, les surfaces ne sont pas sphériques. La ligne faîtière est courbe, horizontale ou mixte (horizontale aux murs et courbes au centre).[198]

Viollet Le Duc considère le système structurel de la croisée d'ogive comme une innovation française qui trouve son origine dans l'arc brisé oriental du 11ème siècle. Selon lui, « ce ne fut que sur le sol français que cet arc détermina une révolution dans l'art de la construction (...) nulle part, ni en Europe, ni en Orient, au milieu du XIIe siècle, on ne construisait de voûtes ayant quelques points de rapports, comme emploi de l'arc brisé, avec celles de l'église de Saint-Denis et de la cathédrale de Paris. Si donc l'arc brisé a pris naissance hors de France comme forme d'arc, nous sommes les premiers qui ayons su l'appliquer à l'une des plus fertiles inventions dans l'histoire de la construction. Cette invention visait à transformer les doubleaux et les formerets en arc brisé, et la diagonale en arc de cercle, dans une volonté de canaliser les poussées vers les

[196] WILLIS, Robert, *On the construction of the vaults of the middle ages,* Royal Institute of British Architects of London, London, 1842 ; VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9, Librairie, Imprimeries réunis, Paris, 1854-1858. http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle.

[197] WILLIS, Robert, *On the construction of the vaults of the middle ages,* Royal Institute of British Architects of London, London, 1842, p.69.

[198] GARCÍA, Esther de Vega, «Angevinas o aquitanas? Bóvedas cupuladas protogóticas en Castilla-León», in *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción,* 26 – 29 Octubre, 2011, Universidad Politecnica de Valencia, SANTIAGO HUERTA, Fernandez, et al. (ed.), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, p. 1439.

appuis ».[199]

La voûte du chœur de la basilique Saint-Denis (1137-1143) est composée de voûtes à croisées d'ogives, d'arcs-boutants et de contreforts séparant les chapelles rayonnantes à plan double. Ce système structurel qui transfère les poussées aux contreforts permet d'ouvrir de grandes baies vitrées dans les murs pour maximiser l'entrée de lumière dans la nef. Pour que la construction soit équilibrée, le système est surchargé au-dessus des tas de charges de manière à rediriger les poussées verticalement.

Mais en Angleterre, avant Saint-Denis, à la cathédrale de Durham (1093-1130), il existait déjà un système similaire (à l'exception des arcs-boutants et de l'ouverture de grandes baies) de voûtes en croisée d'ogives dirigeant les poussées aux contreforts. La voûte de la nef est particulièrement intéressante parce que les doubleaux sont placés entre deux paires d'ogives, ce qui évite de devoir diviser les travées (Figure 16)

La voûte à tiercerons en étoile semble elle aussi être une invention anglaise. Selon Bucher, la complexité des nervures, alternative aux voûtes en croisée d'ogives, est originaire d'Angleterre. La voûte en étoile apparaît dans le carnet de Villard de Honnecourt (1175-1240), sous l'influence des voûtes anglaises (Figure 18). C'est en



Figure 16. Voûte de la nef de Durham.
www.bovedasgoticasdecruceria.com



Figure 17. Voûte du chœur de la cathédrale de Lincoln.
www.bovedasgoticasdecruceria.com

Angleterre, à la cathédrale de Lincoln (après 1239), qu'on introduit la ligne faîtière et les tiercerons qui remplacent les ogives.[200]

À Lincoln, à la voûte du chœur, à la place d'une croisée d'ogives, on

[199] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9, Librairie, Imprimeries réunis, Paris,1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle.

[200] BUCHER, François, *Architector: The Lodge Books and Sketchbooks of Medieval Architects*, vol. 1, Abaris Books, New York, 1979, pp. vi, 411, plus 402 plates and 74 figures, p. 41, p. 197. Bücher considère que l'influence de l'utilisation décorative des nervures anglaises en France et au nord de l'Allemagne doit encore être étudiée.

trouve deux tiercerons de chaque côté d'une travée. Cette disposition provoque un effet visuel de multiplication des nervures au point qu'on peine à distinguer les arcs transversaux. On envisageait d'unifier les travées et faire une surface continue (Figure 17).

Les voûtes à liernes, si caractéristiques de l'Angleterre, datent de la période du *Decorated style (*moitié du 12ème > moitié du 13ème sc.). La période précédente se caractérisée par des voûtes d'ogive quadripartite et sexpartite, comme en France (moitié du 11ème sc. > moitié du 12ème sc.). Plus tard, le *Perpendicular style* voit le développement des voûtes anglaises les plus caractéristiques, les *fan vaults* (moitié du 13ème > moitié du 15ème sc.)[201].

En France, les tiercerons furent utilisés pour la première fois à la croisée de la cathédrale d'Amiens, en 1270. Ce n'est que dans les provinces plus septentrionales, et notamment en Normandie, que l'utilisation des tiercerons et des liernes devient fréquente à partir de la fin du 13ème siècle. En Île-de-France, en Champagne et en Bourgogne, les voûtes d'ogives perdurent jusqu'à la fin du 15ème siècle.[202]

La voûte classique française est une croisée d'ogive sur plan rectangulaire de proportion 1 :2. Plus tard, on dresse des voûtes sexpartites pour les voûtes d'une portée de plus de 15,00m[203]. Vers la fin du 12ème siècle, les nefs pouvaient atteindre une largeur de quinze-seize mètres, ou même de vingt mètres.

L'adoption de la croisée d'ogive de forme cupulaire en région d'Anjou fut innovatrice. Les bâtisseurs ont établi un plan à double croisée d'ogives, comme nous l'expliquerons pour la voûte de l'église de Moulhierne (Cf. le chapitre sur le Portugal, Figure 62). La voûte du chœur de l'abbatiale Saint-Serge à Angers est similaire. L'intention serait de donner la forme bombée habituelle, d'augmenter la hauteur de la clef centrale et la portée de la voûte.

Nous aborderons ce type de structure plus loin, avec la voûte d'ogives composées, système utilisé à la fin du gothique pour faire aussi des voûtes de formes courbes et de grande portée.

Tandis que la France développe le système de la croisée d'ogive, l'Angleterre abandonne le plan simple en faveur des voûtes plus complexes qui multiplie les nervures, avec des tiercerons et des liernes. Willis remarque que le caractère de ces voûtes dépend de la courbure de leurs arcs[204]: observation juste mais difficile à analyser de façon systématique, puisqu'om manque presque totalement de sources contemporaines sur le tracé des voûtes.

Une source plus tardive, Philibert de L'Orme décrit la voûte française comme ayant des arcs de cercle de rayon différent, tous

[201] www.bovedasgoticasdecruceria.com

[202] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9, Librairie, Imprimeries réunis, Paris,1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle.

[203] PALACIOS GONZALO, José Carlos, *La canteria medieval. La construcción de la bóveda gótica española*, Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2009, pp. 57-61

[204] WILLIS, Robert, *On the construction of the vaults of the middle ages,* Royal Institute of British Architects of London, London, 1842, p. 15.

brisés, excepté la diagonale en demi-cercle. L'ogive serait tracée en premier lieu ; pour les autres nervures dont les arcs étaient centrés sur l'imposte, il suffisait de connaître les autres deux points. À sa suite, Derand et De la Rue confirment que le tracé des nervures françaises est toujours en arc de cercle.[205]

L'adoption de l'arc en demi-cercle pour la diagonale a permis de simplifier la construction. Cette simplification, qui était voulue par les constructeurs, s'est traduite par la standardisation des nervures, documentée depuis le 13ème siècle.

Selon Viollet-le-Duc, un croquis du carnet de Villard de Honnecourt illustrerait en effet, comment tracer une voûte à partir du demi-cercle sur la diagonale et obtenir des arcs en ogive à partir de ce même arc (Figure 19). Viollet-le-Duc transcrit la légende de la figure de Villard: «Par chu fait om trois manires dars, a compas ovrir one fois.» Ce qui veut dire: «Par ce moyen l'on fait trois manières d'arcs avec une seule ouverture de compas.» Soit le rayon AB, nous traçons le demi-cercle (plein-cintre) CBD. Posant la pointe du compas en C, avec le même rayon nous traçons l'arc brisé ACE, inscrivant un triangle équilatéral. Abaissant du point E une perpendiculaire sur la ligne de base, le point de rencontre F divise le rayon AC en deux parties égales. Posant la pointe du compas sur F, toujours avec le même rayon nous tracerons l'arc GCH. Les centres de l'arc brisé GCH seront posés sur les points FA qui divisent la base CG en trois parties égales. C'est cet arc auquel quelques auteurs ont

[205] WILLIS, Robert, *On the construction of the vaults of the middle ages,* Royal Institute of British Architects of London, London, 1842, p 21-22.

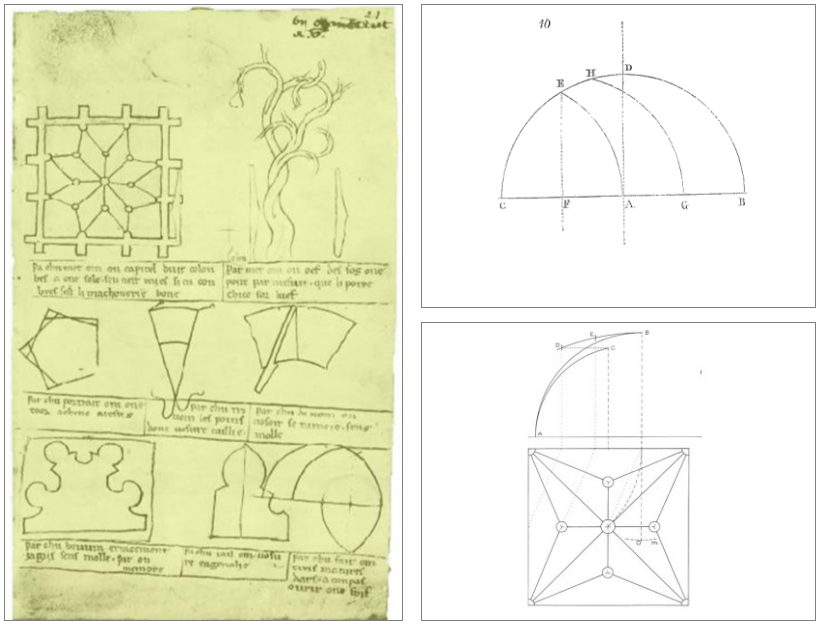


Figure 18. Tiré du carnet de Villard de Honnecourt.
En haut, une voûte à tiercerons en étoile à huit branches.
En bas à droite, tracé d'arcs (figure de gauche).

Figure 19. Interprétation du dessin de Villard de Honnecourt, de Viollet Le Duc.
Tous les arcs sont tracés avec le même rayon (figure droite en haut).
(Viollet Le Duc, 1854-1858)

Figure 20. Interprétation du dessin de Villard de Honnecourt.
Les deux lignes faîtières redescendent en arrivant au mur. (Palacios Gonzalo, 2009)

donné le nom de tiers-point. »[206]

Viollet-le-Duc qualifie les architectes français de « gens de goût » parce que l'ogive ne dépassait pas l'arc équilatéral ; par contre il décrit les Normands et les Anglo-normands comme des « gens pratiques du Nord », moins délicats parce qu'ils utilisaient depuis 1220 des voûtes à arcs de même rayon.

Dans le tracé de Honnecourt, puisque l'arc doubleau et le formeret sont plus bas que la diagonale, les deux lignes faîtières - longitudinale et transversale - de la voûte redescendent en arrivant au mur. Sur la figure, nous présentons l'interprétation de Palacios qui montre la forme que prend la ligne faîtière (Figure 20).[207]

Pour obtenir une ligne faîtière parfaitement horizontale, il faut faire naître le doubleau et le formeret plus haut afin de les faire aboutir à la hauteur de la clef centrale. Pour maîtriser la forme d'une voûte, il faut contrôler la hauteur des clefs, comme nous allons voir à travers plusieurs exemples.

Viollet Le Duc considère que l'arc brisé permettait une économie de tracé et de construction, « on évitait toute complication d'épures et de panneaux, tous taillés d'ailleurs sur une même courbure (à l'extrados) », on pouvait voûter n'importe quel espace « en prenant les hauteurs qui leur convenaient, soit pour les naissances des arcs, soit pour les niveaux des clefs ».

En Angleterre, au moyen des courbes composées, on avait évité les difficultés résultant des courbes de rayons différents pour réaliser les remplissages, puisque, dans ces voûtes anglaises, dès le 14ème siècle, la courbe inférieure est la même pour tous les arcs d'une voûte. En France, sauf à de très rares exceptions, la courbe composée n'est pas employée, les formerets, arcs-doubleaux et arcs ogives ont chacun leur propre courbe, qui est toujours un segment de cercle.[208]

Willis fait remarquer que plusieurs voûtes anglaises dont les arcs diagonaux sont identiques aux doubleaux, et dont les centres sont au niveau de l'imposte, présentent une ligne faîtière courbe. Pour obtenir une ligne faîtière horizontale, la hauteur des arcs doit varier par rapport à l'imposte [209].

Selon Willis, la forme des lignes faîtières est un des premiers éléments à observer pour comprendre la géométrie des voûtes. Les faîtières des voûtes anglaises sont soit horizontales, soit courbes, mais jamais convexes (sauf pour les voûtes en éventail - *fan vaults*). L'auteur explique les diverses hypothèses de tracé, que nous

[206] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9, Librairie, Imprimeries réunis, Paris,1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle.

[207] PALACIOS GONZALO, José Carlos, *La canteria medieval. La construcción de la bóveda gótica española*, Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2009, p. 60.

[208] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9, Librairie, Imprimeries réunies, Paris,1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle.

[209] WILLIS, Robert, *On the construction of the vaults of the middle ages,* Royal Institute of British Architects of London, London, 1842, p. 18.

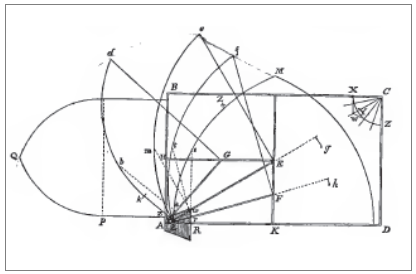


Figure 21. Tracé de voûte.
Arcs de cercle de différents rayons.

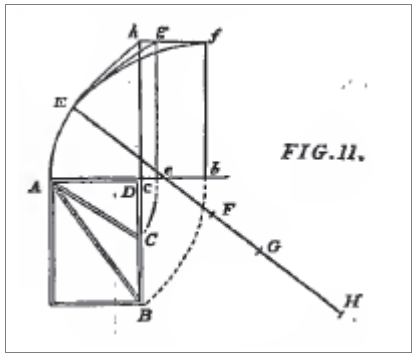


Figure 22. Tracé de voûte.
Arcs à deux centres.

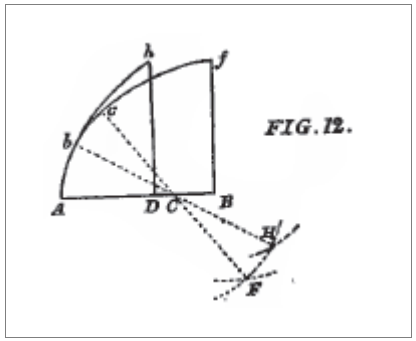


Figure 23. Tracé de voûte.
Arcs à deux centres.

résumons ici.[210]

La première hypothèse utilise un tracé de voûte qui recourt à des arcs de cercle de différents rayons qui naissent au niveau de l'imposte. Trois points sont connus : la naissance, un point sur les reins et la clef. La diagonale, qui est toujours semi-circulaire, serait la première à être dessinée (Figure 21).

Si par contre les rayons des arcs sont tous identiques, les naissances doivent alors être à des hauteurs différentes pour permettre d'atteindre la même hauteur sur la ligne faîtière et il en résulte des formes plus tendues. C'est ainsi que sont apparues les arcs à quatre centres, dont le petit rayon est constant et dont seuls les centres du grand arc varient (Figure 22).

Une autre hypothèse de tracé consiste à maintenir le petit arc inférieur et à faire pivoter le centre du grand arc de manière à le faire aboutir à la clef (Figure 23). En principe, les courbures d'arc du formeret sont différentes de celles des autres arcs.

Willis explique aussi l'évolution des voûtes anglaises, en analysant leurs plans et leurs détails constructifs. Selon lui, la complexité des nervures requiert un tracé précis du plan et se traduit par des types constructifs différents, qu'il divise en trois catégories principales.[211]

Dans un premier groupe de voûtes à liernes, les tiercerons sont en

[210] WILLIS, Robert, *On the construction of the vaults of the middle ages,* Royal Institute of British Architects of London, London, 1842, pp. 20-26.
[211] WILLIS, Robert, *On the construction of the vaults of the middle ages,* Royal Institute of British Architects of London, London, 1842, pp. 39-45.

étoile et, au sommet, les liernes forment des figures centrales : la voûte de King's College (annexe GB4) présente une étoile à six branches à son sommet ; la voûte de l'Archbishop Stratford à la cathédrale de Canterbury forme un losange central (Figure 24.) ; les voûtes de la nef et du cloître de Canterbury forment une double étoile centrale ; le chœur de la cathédrale de Wells possède quatre rangées de carrés aux intersections. Le lierne n'a pas besoin de tracé, parfois il est horizontal, parfois légèrement courbe et il est fait à l'œil. Le seul tracé géométrique à l'échelle était le plan et l'élévation des nervures.

Le deuxième groupe est d'une complexité accrue. Ces voûtes ont plusieurs nervures secondaires qui créent une trame réticulée à leur sommet. Le nombre de clefs augmente et les voûtains entre les nervures se réduisent à l'extrême. Par exemple, les voûtes du chœur de Gloucester (Figure 25) (annexe GB6), le transept de Gloucester, le transept nord de la cathédrale de Bristol (annexe GB2), de la chapelle Saint-Michael de Canterbury, le chœur de York et le cloître de la cathédrale de Canterbury (Figure 26). Cette dernière voûte s'assimile à une voûte en éventail.

Dans le troisième groupe, la méthode de construction a été conditionnée par la multiplication des décors sur les voûtes, ce qui s'est traduit par des nervures et des voussoirs d'un seul tenant. Des exemples : le *Gateway* du Queen's College à Cambridge (annexe GB4), la voûte du tombeau d'Henri V à Westminster (annexe GB7) et la tour sud-ouest de la cathédrale de Peterborough.

Ce dernier style (nervures et voussoirs en une seule pièce) est celui

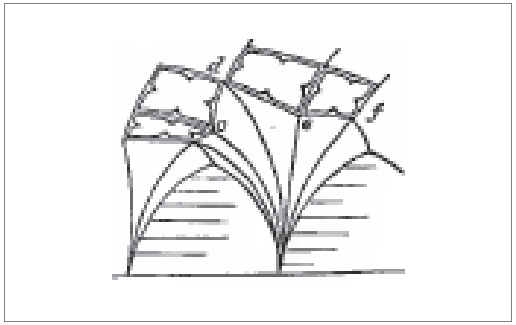


Figure 24. Voûte de l'Archbishop Stratford, cathédrale de Canterbury. Les liernes forment un losange central.
(Willis, 1842)

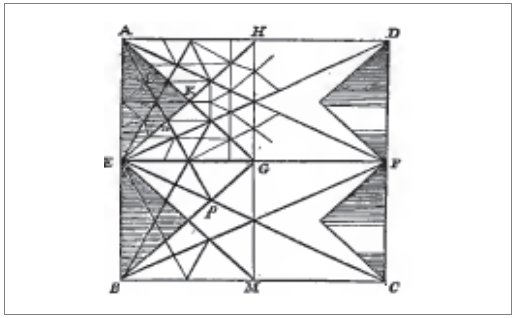


Figure 25. Voûte à nervures composées du chœur de Gloucester.
(Willis, 1842)

des voûtes le plus typiquement anglaises : les voûtes en éventail (*fan vaults*). La recherche de la complexité donne paradoxalement lieu à une simplification du système constructif.

La principale caractéristique de ce type de voûte est la forme conoïde de ses reins, qui résulte de l'emploi de nervures de même rayon, au lieu de nervures de rayons souvent différents, comme

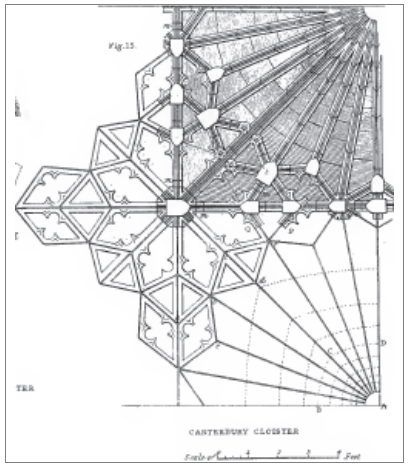


Figure 26. Voûte à lierne du cloître de Canterbury. (Willis, 1842)

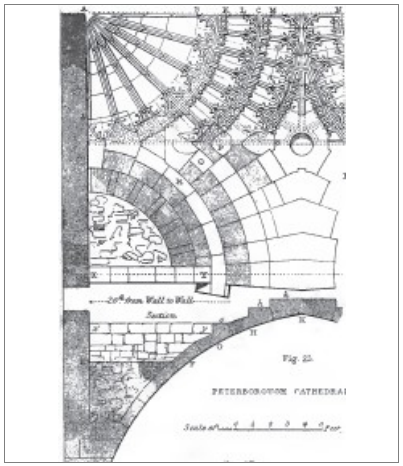


Figure 27. Voûte en éventail de la cathédrale de Peterborough. (Willis, 1842)

celles des voûtes à liernes. Au sommet, on les reconnaît à la nervure courbe en arc de cercle qui délimite le cône (Figure 27), tandis que dans les autres voûtes, les liernes produisent des formes irrégulières. Nous pouvons comparer la voûte à liernes du cloître de Canterbury et la voûte en éventail de la cathédrale de Peterborough.

La voûte de la nef de l'église de Jerónimos est souvent comparée aux voûtes en éventail, parce que les reins s'apparentent une forme en palmier. Cependant, nous verrons plus loin que, à Jerónimos, la forme en palmier n'est pas produite par un arc unique qui pivote autour d'un axe vertical. Les octogones et les carrés centraux rappellent aussi les sommets des voûtes anglaises, pourtant on ne trouve pas en Angleterre de sommets continus transversalement entre les travées. Les églises anglaises sont à nef unique. Dans presque leur totalité, ces voûtes présentent des nervures transversales de même profil que les autres nervures, et avec la présence de la ligne faîtière horizontale, on ne distingue pas la division en travées dans le sens longitudinal de la nef.

En Allemagne et en Europe centrale, les églises halles sont plus courantes et les nefs centrales et latérales atteignent des hauteurs identiques.

Le début de l'architecture gothique en Allemagne et Europe centrale était marqué par la fragmentation des territoires de la période du Saint-Empire romain, par l'absence de monarchie et la diversité religieuse. Les villes étaient en compétition entre elles et les architectes devaient se plier aux exigences de leurs mécènes. Ce n'est qu'au 14ème siècle, sous le règne de l'empereur germanique Charles IV (1355-1378), que la construction des églises commence à être centralisée sous l'autorité royale et que le gothique se développe en Allemagne.[212]

La voûte du chœur de la cathédrale de Prague, (Figure 28) par Peter Parler (1356-99), marque un changement dans l'architecture de

[212] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in *La Piedra Postera.* Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, p. 210.

l'Europe centrale. La suppression des arcs diagonaux et des arcs transversaux qui divisaient traditionnellement les travées inaugure le type de voûtes allemandes réticulées qui tendent vers une forme plus continue en berceau. À partir de là, les voûtes d'Europe centrale se font de plus en plus complexes et adoptent une typologie en réseau.

Norbert Nussbaum souligne l'influence de Parler dans les prototypes anglais, où des techniques similaires ont été employées : voûte du chœur de la cathédrale de Wells (1329-1345) et Saint-Mary à Ottery (vers 1337-1342). Parler avait auparavant réalisé deux petites voûtes, celle du porche sud du transept de la cathédrale pragoise (1367-68) et celle de la porte de la tour d'Altstädter (1370), où il a eu recours aux tiercerons et aux liernes, procédés connus en Allemagne depuis le 13ème siècle. [213]

On rappellera ici l'analyse de Nussbaum sur l'architecture d'Europe centrale, qu'il qualifie d'hybride, simplificatrice et déconstructiviste.

Nussbaum relève ce caractère hybride à Prague, dans la voûte du porche sud du transept (Figure 29) et dans le corps d'escalier saillant intégré dans le contrefort, solution qui est aussi celle qui fut utilisée par Johanes Hültz à la cathédrale de Strasbourg (1437). Nussbaum y voit là une intention de « provocation » de la part des architectes. [214]



Figure 28. Chœur de la cathédrale de Prague.
La première voûte à nervures composées en Europe Centrale, constituée de tiercerons, dépourvue de diagonales et de transversales divisant les travées (www.bovedasgoticasdecruceria.com)

Si les voûtes à clefs pendantes sont assez courantes en Angleterre,

[213] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in *La Piedra Postera.* Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, p. 215. Concernant l'expérience de Parler avec l'architecture anglaise, Nussbaum renvoie à la bibliographie de Crossley 2003, p. 53-82.

[214] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in *La Piedra Postera.* Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, pp. 213-215.

elles sont rares en Allemagne, ou en France. [215]

On retrouve cet hybridisme dans certaines voûtes à nervures qui sont dépourvues de remplissage entre elles, comme dans une chapelle latérale nord de l'église Saint Léonard à Francfort, et nous évoquerons plus loin des exemples espagnols de voûtes ajourées de Juan et Simón de Colonia.

Contrariant l'opinion courante, Nussbaum relève une simplification de l'architecture en Europe centrale et il donne des exemples attestant le rationalisme et la standardisation de la construction, notamment dans le cas des églises-halles[216]. Dans les églises-halles du 14ème et 15ème siècle, les nefs se contrebutent entre elles, ce qui dispense de devoir construire des contreforts et des arcs-boutants : le nombre de fenêtres est réduit de moitié grâce à la suppression du triforium et on ne trouve plus qu'une toiture au lieu de trois.

Une autre simplification est celle qui intervient au niveau du plan : les piliers sont désormais séparés par un même écartement, ce qui autorise des longueurs d'arcs égales. Le premier exemple de ce type est celui du chœur de Schwäbisch-Gmünd, 1351-1410 (annexe DE17), sur un plan de Heirrich Parler, variante du classique plan radial de Villard de Honnecourt.

D'autres exemples sont cités, avec des piliers en nombre réduit et non-alignés orthogonalement, ce qui permet d'obtenir des longueurs d'arcs similaires le long du déambulatoire. Il n'y a plus de doubleaux divisant les travées. La voûte est constituée de tiercerons radiaux en étoile, couramment appelé « voûte en parapluie ». Voûtes de l'hôpital Hl. Geis à Landshut, la Franziscanerkirch et le chœur de la cathédrale de Salzburg, Bürgerspitalkirche à Braunau, Autriche. Une structure similaire a été utilisée pour la nef de Spitalkirche de Braunau, où l'on observe une répétition « infinie » de la « voûte en parapluie sexpartite ».

Nussbaum souligne aussi une innovation architecturale en Europe centrale : le déconstructivisme. Les nervures semblent perdre leur naissance en une espèce de négation de la fonction structurelle des piliers, qui semblent ne plus être nécessaires. L'auteur donne l'exemple de la voûte de Benedikt Ried à Hradshin (Figure 30), Prague, 1505, constituée des détails complexes, avec des rotations de nervures et des interpénétrations s'assimilant à une structure en « bouts de bois ».[217]

[215] HOFFSTADT, Frédéric, *Principes du Style Gotique, exposés d'après des documents authentiques du Moyen Âge avec 40 planches in-folio, à l'usage des artistes et des ouvriers.* Traduit de l'Allemand par Théodore Aufschlager. Liège: E. Noblet, 1851, p.339. Hoffstadt affirme que ces clefs sont fixées par des armatures en fer.

[216] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in *La Piedra Postera.* Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, pp. 218-229. Nussbaum fait une intéressante analogie avec l'architecture moderne, et le concept du *less is more* de Mies van der Rohe.

[217] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in *La Piedra Postera.* Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, pp. 228-229.

Une innovation des pays d'Europe centrale, qui est reconnue par plusieurs auteurs, sont les nervures courbes en plan, technique utilisée en Allemagne depuis le début du 15ème siècle et qui devint très populaire en Bohême, Saxe, Autriche, ainsi qu'en Espagne.[218]

Bucher considère que, vers 1500, l'Europe du Nord a créé un type de voûtes unique en recourant aux nervures à double courbure (*Schlingenrippengewölbe*), dans l'orbite de Benedikt Ried, d'Anton Pilgram et d'autres. Vers 1570, à la fin du gothique, les derniers architectes qui ont résisté à l'avènement de la Renaissance sont Benedikt Ried à Prague (1503-05) avec des doubles courbures et des nervures interrompues, pulpite Erhard Heydenreich à Vienne, les arcs à double courbure et pendentifs était les limites du style. Seules les villes de moindre importance poursuivaient la tradition du bâtir gothique[219].

Bürger considère que les nervures courbes étaient une mode. Vienne et Prague étaient des villes friandes d'innovation tandis que Cologne était plus conservatrice. À Vienne, les tiercerons des voûtes en étoile furent remplacés par des nervures courbes. À Prague, les nervures courbes sont indépendantes et suivent d'autres schémas.[220]



Figure 29. Voûte du porche sud de la cathédrale de Prague.
Le caractère hybride de la voûte dépourvue de voussoirs.
(Nussbaum, 2007)

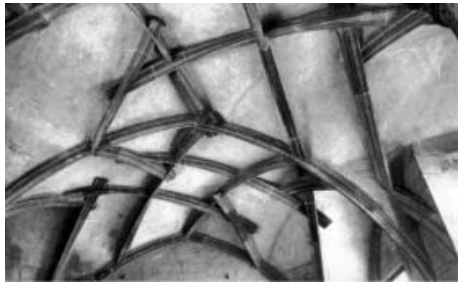


Figure 30. Voûte de Benedikt Ried à Hradshin, Prague. On note le déconstructivisme des nervures, qui sont dépourvues de naissance.
(Nussbaum, 2007)



Figure 31. Hall Vladislav, palais de Prague. 16m de portée.
Voûte à nervures courbes, une innovation de l'Europe centrale.
(www.bovedasgoticasdecruceria.com)

[218] WENDLAND, D., "Arches and Spirals: The Geometrical Concept of the Curvilinear Rib Vault in the Albrechtsburg at Meissen and Some Considerations on the Construction of Late Gothic Vaults with Double-Curved Ribs ", in *Nuts & Bolts of Construction History: Culture, Technology and Society*, R Carvais et al., Picard, Paris, 2012, p. 351.
[219] BUCHER, François, *Architector: The Lodge Books and Sketchbooks of Medieval Architects,* vol. 1, Abaris Books, New York, 1979, p.195.
[220] BÜRGER, Stefan, information oral.

Wendland apporte des informations pertinentes sur les nervures courbes.[221]

Cet auteur remarque les grandes portées qui ont été couvertes grâce aux nervures courbes. La voûte du hall Vladislav du palais de Prague, achevée en 1502, franchit une portée de 16 mètres (Figure 31). Son auteur Benedikt Ried, est aussi l'auteur d'autres voûtes de ce genre, *Knight's Stairway* et l'église à Kutna Hora (1389). Jakob Helmann, probablement disciple de ce dernier, a construit la voûte d'Annaberg (annexe DE2), achevée en 1525 et la salle d'armes du château d'Albrechtsburg à Meissen.

Wendland indique qu'au palais d'Albrechtsburg à Meissen, des nervures curvilignes supplémentaires ont été ajoutées à l'extrados de la voûte et relient les voûtains, comme à Vladislav Hall, ce sont des « nervures structurelles intégrées dans la maçonnerie ».[222]

Le tracé des voûtes en Europe centrale est décrit dans plusieurs manuscrits du 15ème et du 16ème siècle conservés à la cathédrale de Vienne, qui comportent des plans et des élévations des nervures.[223]

Bucher (1972) observe que, parmi les 5000 dessins qu'il a analysés, seule une douzaine indiquent des dimensions, qui semblent de surcroît avoir être introduites *a posteriori*. Cet auteur souligne l'importance de la proportion et de la géométrie dans la méthode de tracé des voûtes.

Bucher cite :

> "…Don't marvel that all the science lives only by the science of geometry…There is no tool to work with that has no proportion. And proportion is measure, and the tool or time instrument is earth. And geometry is…the measure of earth, wherefore I may say that all men live by geometry…You shall understand that among all the crafts of the world….masonry has the most notability and most part of the science is

[221] WENDLAND, D., "Arches and Spirals: The Geometrical Concept of the Curvilinear Rib Vault in the Albrechtsburg at Meissen and Some Considerations on the Construction of Late Gothic Vaults with Double-Curved Ribs", in *Nuts & Bolts of Construction History: Culture, Technology and Society*, R Carvais et al., Picard, Paris, 2012, pp. 351-357.

[222] WENDLAND, D., "Arches and Spirals: The Geometrical Concept of the Curvilinear Rib Vault in the Albrechtsburg at Meissen and Some Considerations on the Construction of Late Gothic Vaults with Double-Curved Ribs ", in *Nuts & Bolts of Construction History: Culture, Technology and Society*, R Carvais et al., Picard, Paris, 2012, p. 351, pp. 356.

[223] Un grand nombre de documents ont été publiés par Hans Kopf en 1969. Ulrich Coenen a traduit trois de ces traités : *Unterweisungen* (Instructions) de Lonrenz Lechler (1516), *Von des Chores Maj3 und Gerechtigkeif* (vers 1500) et *Wiener Wekmeisterbuch* (1400-1450). Bucher (1972) a publié et analysé plusieurs de ces manuscrits[223] : les carnets de Wolfgang Rixner, c. 1445-1515, Jerg Reiter et autres (1540-1599 ou 1608), avec 83 voûtes et des textes sur les proportions et des exemples de la région de Stuttgart et Zeil, près de Bamberg ; le traité de Lorenz Lechner (Lechler), de 1516, avec 9 pages d'illustrations de voûtes et 37 pages sur les principes d'Architecture ; *Dresden Sketchbook of vault projection*, aussi désigné de *Codex Miniatus3* (1560-70), un résumé sur les tracés de voûtes avec 32 exemples provenant surtout du nord-est de l'Allemagne et de la Bohême ; *The Frankfurt Lodge Book of Master WG (1560-1572),* maçon et sous-traitant d'Abelin Jörg à Stuttgart, contenant 147 projets et 28 épures de voûtes ; le traité de Jacob Facht von Andernach, 1593, de 124 pages, qui contient 42 pages avec des tracés de voûtes.

geometry." – Adapted fom the The Constitutions of Masonry (ca. 1400). [224]

En Europe du nord, jusqu'au 18ème siècle, on préférait travailler avec les proportions géométriques qui produisent des proportions mathématique irrationnelles.[225]

Plusieurs dessins du maître WG témoignent d'une hésitation entre la méthode géométrique et la méthode arithmétique. Certains cas ne suivent pas les préceptes de Vitruve, dont tous les éléments doivent avoir un rapport avec le tout et suivre une des parties sélectionnée comme standard.[226]

Les croquis de WG sont d'incision avec un stylo de fer ou bronze et parfois finis par de l'encre marron. Dans la plupart des schémas de projection de voûtes, un *reddish-brown wash* était rajouté probablement pour indiquer la hauteur de la nervure diagonale et les nervures subsidiaires de l'arc croisée. Quelques dessins étaient incisés et ensuite coupés par un *straight-edge* et un couteau. Les dessins coupés sur papier pourraient être vu d'en bas et donner une idée de la réalité[227].

Les illustrations de WG que présente Bucher montrent plusieurs types de voûtes. Prédominent les voûtes à tiercerons et les voûtes à liernes en étoile. On trouve peu d'exemples de voûtes à nervures à double courbure, solution de la fin du 15ème siècle. On trouve plusieurs exemples de voûtes à *double* ou *triple carré,* selon description de Bucher. La voûte *à triple carré* de la planche 224 est identique à la voûte du transept de Jerónimos. (Figure 32 C, E)

Nous avons trouvé quelques voûtes de ce genre. La plus ancienne est la voûte de la croisée de Notre-Dame de Trèves, à quatre croisées d'ogives sur plan carré de (2x2) travées. Nous retrouvons des plans similaires à la cathédrale de Prague, à la sacristie (1360) et à Wenzelskapelle (1367), et en Autriche, à l'église paroissiale de Kolberg (1410).

Les voûtes de la nef et des bas-côtés de l'église de Braniewo (1343), en Pologne, est comparable au plan du transept de Jeronimos. Le plan d'une travée forme quatre étoiles. Des liernes se prolongent et traversent les travées parallèlement aux ogives (Figure 33).

[224] BUCHER, François, *Architector: The Lodge Books and Sketchbooks of Medieval Architects,* vol. 1, Abaris Books, New York, 1979, pp. 7-14.
[225] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in *La Piedra Postera.* Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, pp. 223-224.
[226] BUCHER, François, *Architector: The Lodge Books and Sketchbooks of Medieval Architects,* vol. 1, Abaris Books, New York, 1979, p.199.
[227] BUCHER, François, *Architector: The Lodge Books and Sketchbooks of Medieval Architects,* vol. 1, Abaris Books, New York, 1979, pp. 196-198.

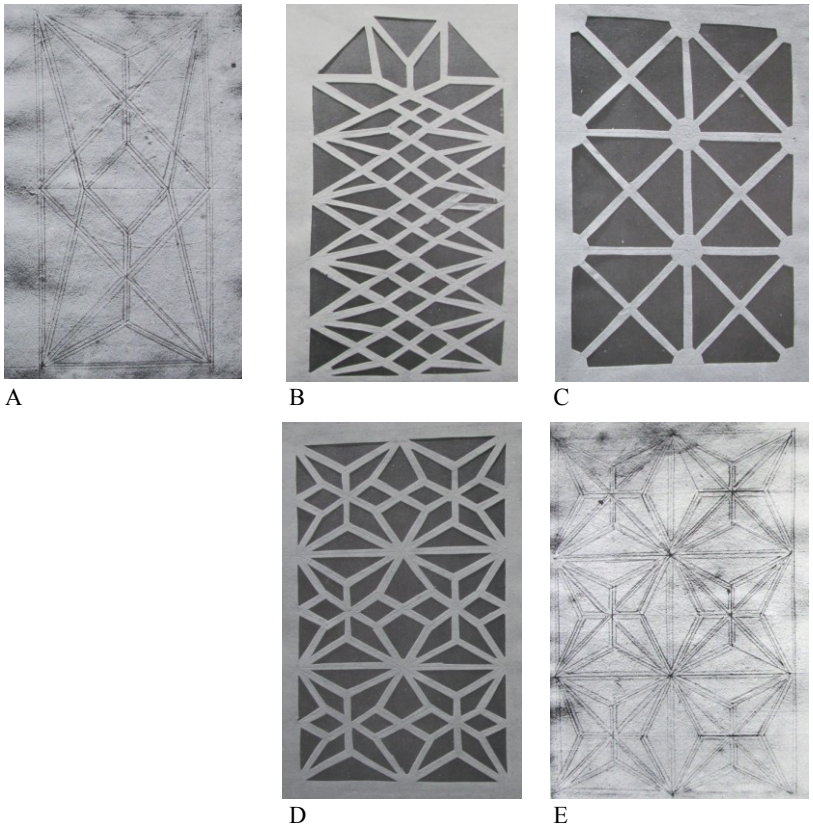


Figure 32. Illustrations de voûtes à nervures composées du carnet *The Frankfurt Lodge Book of Master WG,* 1560-1572.
A) Planches 29; B) planche 233 ; C) planche 149 ; D) planche 151; E) planche 224 (Bucher 1979).
Les deux schémas de droite semblent le plan du transept du monastère de Jerónimos, de João de Castilho.

La voûte du réfectoire du monastère de Neuzelle (15ème siècle) compte neuf croisées, sur un plan unique de 3x3 travées. Ce monastère comporte d'autres voûtes similaires, celle-ci est le seul exemple que nous avons trouvé dont l'ogive principale traverse trois travées (Figure 34). La voûte de la chapelle de Prague présente aussi un plan (3x3), mais ses ogives traversent deux travées. Bucher observe quelques particularités géométriques : a) les proportions les plus fréquentes sont 1:2, 2:3 et 3:4 ; b) les figures géométriques utilisées étaient peu nombreuses ; c) le carré était la figure la plus importante et ses dérivations par superposition et rotation, ainsi que sa diagonale qui générait d'autres figures comme le rectangle d'or ; d) le triangle fut très utilisé, surtout dans la phase finale du gothique ; e) la rotation d'un triangle équilatéral permet d'obtenir un hexagone ; f) les pentagones et les heptagones, formes plus complexes, étaient rarement utilisés ; g) la forme des nervures était l'arc de cercle et on évitait les ovales et ellipses, contre les fausses ellipses, plus faciles à tracer, divisant la base en trois par où passent les lignes contenant les centres des arcs de cercles ; h) le surbaissement de l'arc dépendait de la longueur du rayon ; i) dans la plupart des cas, les nervures ont un seul et même rayon, qui est manière de systématiser leur préfabrication[228].

[228] BUCHER, François, *Architector: The Lodge Books and Sketchbooks of Medieval Architects,* vol. 1, Abaris Books, New York, 1979, pp. 7-14. En ce qui concerne la standardisation, Bucher remet en cause l'idée du "secret" des maîtres-maçons.

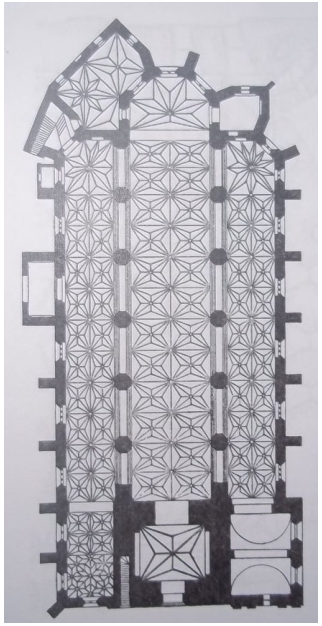


Figure 33. Église de Braniewo
(Clasen 1958)

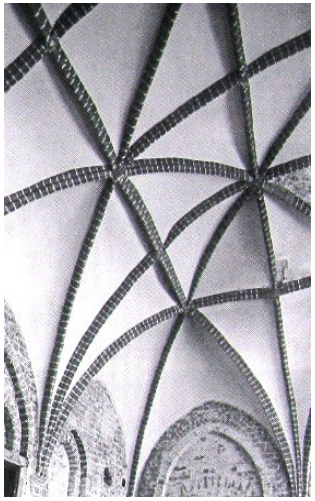


Figure 34. Monastère de
Neuzelle
(Bürger 2007)

La standardisation de l'arc simplifie la construction et la conception. Les tracés qui figurent dans les manuscrits, représentent le plan de la voûte et l'élévation d'un seul arc.

Bürger confirme que la plupart des tracés de l'époque n'ont que l'élévation d'une seule nervure. À ce propos, détail intéressant, il fait remarquer que les architectes n'étaient pas payés au plan mais par unité de longueur des nervures.[229]

Ranisch (1695) a analysé les tracés des bâtiments religieux de Dantzig et introduit le concept de *Prinzipalbogen*, technique de conception et d'élévation des nervures recourant à un arc principal réutilisé pour toutes les nervures[230]. Ce principe a été suivi jusqu'au 20ème siècle, par Hoffstadt (1840), Ungewitter (1859) et Meckel (1933).

Hoffstadt cite Ranisch pour expliquer la méthode de *prinzipalbogen*:

« Le tracé des arceaux consiste à décrire l'arc le plus grand, c'est-à-dire celui dont la naissance est la plus éloignée du centre de la voûte. Sur cet arc, on détermine la longueur de chaque arceau, la hauteur à laquelle il se trouve dans la voûte, ainsi que la position et l'étendue des clefs qui terminent chaque système d'arceaux croisés »[231].

L'arc plus long est celui de la diagonale. Pour cette raison, les plans des voûtes n'ont plus que le tracé de cet arc, en forme de demi-

[229] Information orale de Stefan Bürger.
[230] PLIEGO de ANDRÉS, Elena, "La geometría de las bóvedas estrelladas en el gótico tardío alemán", in *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción,* 26 – 29 Octubre, 2011, Universidad Politecnica de Valencia, Santiago Huerta, Fernandez, et al. (ed.), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, p.1148. Ranisch, *Beschreibung aller Kirchengebäude der Stadt Danzig*. Danzig. 1695, Plans et élévations de tous les bâtiments religieux de la ville de Danzig. Cet ouvrage contient et décrit 42 tracés de voûtes en plan et en élévation.
[231] HOFFSTADT, Frédéric, *Principes du Style Gotique, exposés d'après des documents authentiques du Moyen Âge avec 40 planches in-folio, à l'usage des artistes et des ouvriers.* Traduit de l'Allemand par Théodore Aufschlager. Liège: E. Noblet, 1851, pp. 340.

cercle.

La demi-circonférence est couramment utilisée également pour les voûtes réticulée, comme exemples, la cathédrale d'Ulm (annexe DE20), l'église Saint-Mathias de Trèves, l'église Sainte-Marie à Dantzig. L'ellipse et l'ovale ne sont pas utilisés.[232]

Dans la planche XIV A (Figure 35), Hoffstadt présente plusieurs tracés, y compris ceux de Ranisch pour les voûtes de l'église Sainte-Marie à Dantzig : les voûte à liernes du chœur, en étoile à six branches, et celle en étoile à 8 branches, la voûte à *combados* à 8 lobes ogivales inscrit en quatre-feuilles d'arcs en accolade et la voûte à tierceron du chœur, en étoiles à huit branches. Toutes ces voûtes sont tracées avec l'arc principal placé sur la diagonale, de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan, un arc en demi-cercle.

Les tracés de la figure 1 montrent cinq hypothèses d'élévation des nervures pour un même plan de voûte en étoile à quatre branches. La méthode d'élévation est la même de *Prinzipalbogen* pour les cinq exemples. La différence réside dans le rayon des arcs. Dans le premier exemple, le rayon est égal à la moitié de la diagonale en plan, un quart d'arc de cercle (ad1). Dans le deuxième exemple, l'arc est ogival (b ad1). Dans les trois derniers exemples, le rayon est égal au double de ad (plans c, d, e ad1). Pour ce dernier groupe, Hoffstadt recommande de ne pas utiliser le tracé dont les centres

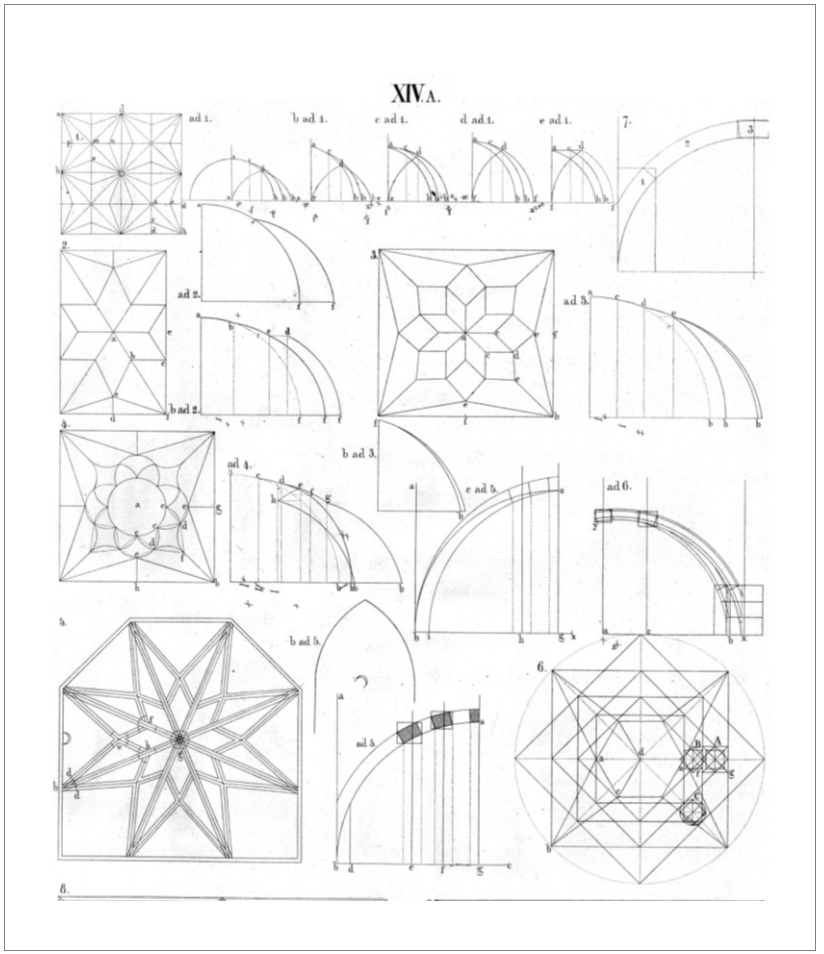


Figure 35. Illustrations de Hoffstadt pour des tracés de voûtes à liernes et des voûtes *à combados*. Planche XIVA partielle (Hoffstadt, 1851).

[232] HOFFSTADT, Frédéric, *Principes du Style Gotique, exposés d'après des documents authentiques du Moyen Âge avec 40 planches in-folio, à l'usage des artistes et des ouvriers*. Traduit de l'Allemand par Théodore Aufschlager. Liège: E. Noblet, 1851, pp. 331-335.

sont plus hauts que la ligne de naissance des nervures puisque l'arc rétrécit vers la naissance, mais plutôt d'utiliser le dernier, avec le sommet horizontal, plus commun.

La procédure de tracé de l'élévation des nervures est la suivante : on trace d'abord l'arc de la diagonale ; sur la ligne horizontale, qui représente le niveau de naissance des arcs, on projette les longueurs des nervures et leurs distances à la clef centrale (ligne verticale en pointillé), tiré du plan ; on projette verticalement les nervures, on prend leur hauteur au croisement de la verticale avec le quart de cercle ; à partir de la clef et de la naissance des nervures, on trace deux arcs de cercle de même rayon que la diagonale et qui se recoupent. Leur croisement donne le centre de l'arc de la nervure.

Un même plan de voûte peut prendre plusieurs formes en fonction de l'arc principal qui est utilisé. Le plus courant est la diagonale en demi-cercle qu'on retrouve dans les exemples suivants de la planche et dans la plupart des tracés de l'époque.

Analysons le tracé de la voûte du chœur, voûte à liernes en étoile à six branches (Figure 36). Sur la figure ad 2, le tracé des nervures du quadrant droit : on trace l'arc de cercle de la diagonale, la *prinzipalbogen*, de rayon (af); on prend la distance (ae) en plan, et on projette verticalement la clef (e) sur l'arc ; on place (f) sur la ligne horizontale de naissance des arcs, avec la distance (ef) en plan; avec le centre du compas en (e) et (f), on trouve le centre de l'arc et on trace le formeret (ef). Sur la figure nº b ad 2, on représente l'élévation des nervures à gauche de la diagonale : on trace de nouveau l'arc diagonal de rayon (af) ; on projette verticalement la clef (b) sur la diagonale avec la distance (ab) en plan, on projette verticalement la clef (c) à partir de la distance (bc) tirée du plan et de la hauteur de (c) tirée de l'arc diagonal, on trouve le centre de (bc) à partir de (b) et (c) et on trace le lierne (bc) ; on place (f2) sur la ligne horizontale, avec la distance (cf2) tiré du plan, on trouve le centre et on trace l'arc du tierceron (cf2) ; on projette verticalement la clef (d) avec la distance (cd) tiré du plan et la même hauteur de (c), on place (f3) sur la ligne horizontale, avec la distance (df3) tirée du plan, on trouve le centre et on trace l'arc (df3) du formeret transversal.

Cette méthode repose sur deux principes de base. Le premier est celui d'une courbe principale unique (standard), correspondant à celle de la diagonale et qui sert à tracer toutes les nervures (standardisation). Le second consiste à contrôler la hauteur des clefs, tiré à partir de l'arc principal. L'arc détermine la forme de la voûte. On progresse du haut vers le bas et du centre vers les appuis. On trace d'abord les liernes et ensuite les tiercerons. Par conséquent, la voûte acquiert une forme sphérique centrale, composée de liernes de même rayon tournant sur la clef central. La ligne faîtière n'est pas continue, mais en résulte une forme mixte.

On remarque que cette méthode est aisée puisque, pour tracer et construire la voûte, il suffit de connaître le plan et la *prinzipalbogen*.

La méthode de tracé de la voûte à lierne en étoile à huit branches, représenté sur la figure 3, est identique à la précédente. Bien que la diagonale soit interrompue, c'est son tracé en élévation qui dicte la forme et la hauteur des clefs.

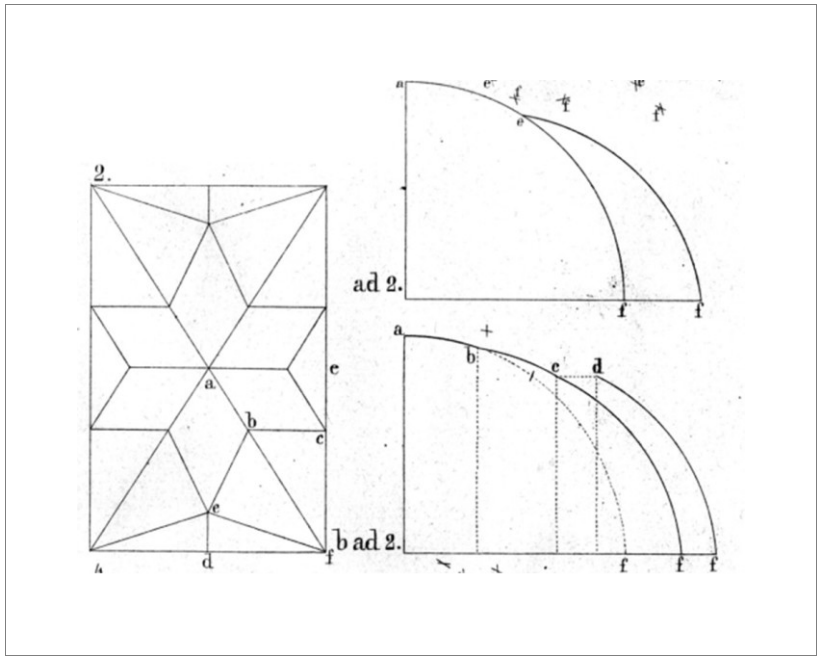


Figure 36. Tracé de Ranisch pour la voûte du chœur de l'église Sainte-Marie à Dantzig. (Hoffstadt 1851)

Le tracé des nervures courbes en plan semble également facile, comme l'explique Hoffstadt pour la voûte de la figure nº 4 : il suffit de tracer l'élévation des cordes de ces arcs.

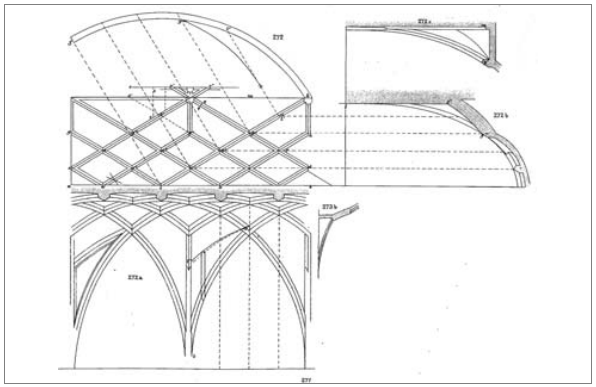
Les figures nº 5 et 6 représentent des tracés plus détaillés expliquant la taille des clefs et du tas-de-charge. Sur la figure 5, la nervure est tracée avec deux lignes - intrados et extrados. L'arc principal de rayon égal au demi-cercle de la diagonale en plan est celui qui est tangent au mur, sur la ligne de l'extrados. Les tiercerons naissent à un niveau beaucoup plus élevé que la diagonale. Ungewitter (1859-1864) et Meckel (1933) reprennent la méthode de Ranisch pour tracer l'élévation des voûtes et pour des exemples de voûtes en étoile et en réseaux sans diagonale. Les auteurs proposent l'arc principal tracé sur le tierceron plus long de la voûte (Figure 37 et Figure 38).[233]

On trouve cependant des exemples où l'on n'identifie pas d'arc principal qui se répète.

Talavero a procédé à l'analyse géométrique de la voûte du narthex d'Annaberg et il ne reconnaît pas un arc principal générateur de la forme. [234]

[233] PLIEGO de ANDRÉS, Elena, "La geometría de las bóvedas estrelladas en el gótico tardío alemán", in *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, 26 – 29 Octobre, 2011, Universidad Politecnica de Valencia, Santiago Huerta, Fernandez, et al. (ed.), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, p.1151.

[234] TALAVERANO, Rafael Martín, "Técnicas de diseño germanas de bóvedas de crucería rebajadas", in *Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción*: Santiago de Compostela 26-29 octobre 2011, eds. S. Huerta, I. Gil Crespo, S. García, M. Taín. Madrid, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 864-868.



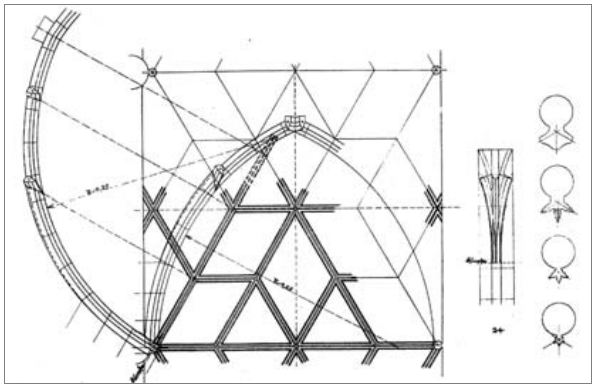


Figure 37. Tracé d'Ungewitter. (Pliego de Andrés, 2011)

Figure 38. Tracé de Meckel. (Pliego de Andrés, 2011)

Wendland donne l'exemple de la voûte à nervures curvilignes du 2ème étage du *Hall of arms* du palais d'Albrechtsburg à Meisen (annexe DE10), construit en 1522 par Jakob Helmann. La voûte est composée de diagonales et de nervures courbes en plan. Les nervures ont le même profil et leurs naissances sont situées à différentes hauteurs. Selon Wendland, les niveaux d'intersection des nervures sont prédéterminés, contrairement à la situation habituelle, dont la hauteur est conséquence de l'arc principal. En plan, les nervures courbes sont ovales ; en élévation, leur rayon diffère de celui de l'arc principal, la diagonale. Selon Wendland, il s'agit là du premier exemple d'ovale découvert dans un tracé de voûtes allemandes, ce qui était habituellement considéré comme n'existant pas. Cette forme est pourtant courante dans les voûtes anglaises et espagnoles[235].

Werner Müller analyse les tracés de voûtes du *Codex Miniatus 3* et propose trois méthodes de tracé. Talaverano résume les méthodes proposées par Müller. La première est la même que celle de Ranisch, la conception préalable d'une surface régulière, cylindre ou sphère, sur laquelle on projette verticalement les clefs et où l'on trace les nervures de même rayon que l'arc principal, normalement celui de la diagonale, à partir du sommet. La deuxième méthode part aussi d'une surface régulière sur laquelle on projette les clefs, mais avec

[235] WENDLAND, David, "Arches and Spirals: The Geometrical Concept of the Curvilinear Rib Vault in the Albrechtsburg at Meissen and Some Considerations on the Construction of Late Gothic Vaults with Double-Curved Ribs". in *Nuts & Bolts of Construction History: Culture, Technology and Society, ed. by R Carvais et al., Picard, Paris, 2012,* pp. 352-355.

un tracé de l'élévation des nervures utilisant des arcs de rayons différents. Dans la troisième méthode, la voûte est tracée à partir d'un arc principal, depuis la base. A partir du point de départ, il faut effectuer la translation de l'arc principal, lequel donnera la hauteur de toutes les clefs de la voûte et gérer la forme qui est incontrôlable.

La Figure 39 explique la méthode : on définit d'abord le point de départ (0) et la courbe de l'arc (r). Pour déterminer la hauteur d'un point (1), on prend la mesure (d1) sur le plan et on opère la translation de l'arc en élévation. Un des avantages de cette méthode est de permettre de tracer des nervures à double courbure en plan et en élévation. Cette méthode suggère une rigidité de la forme. Dans certains exemples du *Codex Miniatus 3*, la forme est contrôlée par l'inclinaison de certains arcs, cependant il en résulte des pics et discontinuité dans les nervures [236].

Dans les deux premières méthodes, la forme de la voûte est préalablement conçue et elle commande la position des clefs et la forme des nervures. La troisième méthode, au contraire, ne permet pas de contrôler la hauteur des clefs ni la forme de la voûte.

Stefan Bürger à ce propos, fait référence à deux méthodes, soit à partir du haut soit à partir du bas. Quand on part du haut (de la clef) les nervures se croisent au tas de charge, à la manière de Benedickt Ried et Jackob Heilman, vers 1500.[237]

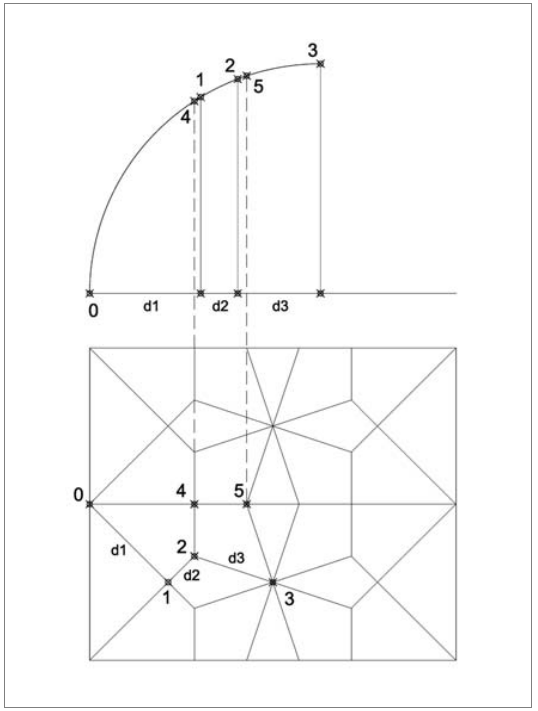


Figure 39. Élévation des nervures à partir de l'arc principal selon Müller. (Talaverano 2011).

Ces méthodes de tracé ne permettent pas de contrôler la forme de la

[236] TALAVERANO, Rafael Martín, "Técnicas de diseño germanas de bóvedas de crucería rebajadas", in *Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción*: Santiago de Compostela 26-29 octobre 2011, eds. S. Huerta, I. Gil Crespo, S. García, M. Taín. Madrid, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 862-864.

[237] BÜRGER, Stefan, information orale.

voûte. On trouve cependant des exemples avec des lignes faîtières horizontales ou courbes en arc de cercle, ce qui indique que certaines voûtes ont dû être tracées après que leur axe ait été préalablement défini. Selon Hoffstadt, on trouve diverses lignes de sommités: ligne droite horizontale, la plus courante- cathédrales de Marbourg, Cologne, Fribourg (annexe DE7) - Brisée au sommet – cathédrale de Strasbourg (annexe DE18), de Ratisbonne, en arc de cercle, Ste-Catherine à Oppenheim - composée de deux arcs de cercle dont les flèches sont sur une même horizontale – cathédrale d'Anvers et des formes mixte (pas illustré), circulaire au milieu et droit vers les murs[238].

Dans les traités, les questions concernant la maçonnerie des voûtains est négligées au profit de l'étude des nervures. Il existe peu d'études concernant les voûtains.

Des études sur les ouvrages en brique ont été réalisées par J.-C. Lassaux (1831) qui a formulé une hypothèse de construction des voûtains sans cintres. Selon l'auteur, de par leur forme en arc, les voussoirs sont stables et se supportent entre eux. [239]

Actuellement, David Wendland étudie ce sujet et mène une série d'études et d'expériences pratiques sur la construction de voûtains en brique sans cintres. Selon l'auteur, la stabilité est assurée par la forme des voûtains. Il considère aussi la possibilité qu'il y ait un tracé pour les voûtains[240].

À l'époque la plupart des tracés des nervures étaient préalablement testés avec des modèles en bois[241]. Nous pouvons en voir un exemple à Nürnberg, daté de 1659. (Figure 40).

Les lignes faîtières des églises-halles allemandes sont souvent horizontales longitudinalement mais elles sont brisées transversalement, les nefs restent indépendantes. C'est le cas d'Amberg annexe DE1), Augsburg (annexe DE3), Dingolfing (annexe DE4), Dinkelbuhl (annexe DE5.), Freiberg (annexe DE6), l'hôpital de Landshut (annexe DE8), Saint Martin à Landshut (annexe DE9).

La voûte à nervures courbes de Sainte-Anne à Annaberg (annexe DE2) est celle qui présente plus d'unité entre les nefs grâce à sa ligne faîtière horizontale transversalement, mais la faîtière longitudinale est courbe, brisée dans le sens longitudinal.

[238] HOFFSTADT, Frédéric, *Principes du Style Gotique, exposés d'après des documents authentiques du Moyen Âge avec 40 planches in-folio, à l'usage des artistes et des ouvriers.* Traduit de l'Allemand par Théodore Aufschlager. Liège: E. Noblet, 1851, pp. 334-335

[239] LASSAUX, M. de, *"Description of a mode of erecting light vaults over churches and similar spaces",* in *Journal of the Royal Institution of Great Britain*, London, John Murray, 1831, vol. I, pp. 224-40.

[240] WENDLAND, David, "Some Considerations on the shape of the caps of vaults. In: *Proceedings of the International Seminar on Structural analysis of historical constructions,* P.Roca, P. Lourenço, C. Modena, Padova, Leiden, Balkema, 2004, pp. 111-114.

[241] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in *La Piedra Postera.* Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, p. 229.

Nous avons trouvé deux églises qui présentent une surface de voûte plus élargie, bien que brisé en section, celles de Hirschfeld (Figure 41) et de Laun (Figure 42). Le plan des nervures à Hirschfeld forme un réseau de formes croisées. Le plan de la voûte de l'église-halle de Laun, ressemble beaucoup à celui de la voûte de la nef du monastère de Jerónimos : au centre, on retrouve la même forme cupulaire octogonale et, entre les piliers, une forme carrée qui élargit le sommet de la voûte. La différence est que dans le cas présent, on a des nervures longitudinales et transversales, les figures ne sont pas limitées par des *combados*. La ligne faîtière générale de la voûte est brisée, comme on l'observe le long de l'axe transversal de la voûte.

La continuité de l'espace dans les voûtes allemandes n'est pas obtenue par la continuité de la voûte, comme à Jerónimos, mais plutôt par la continuité des nervures qui se croisent et se perdent de leur support (le déconstructivisme dont parlait Nussbaum). L'espace devient continu et fluide, grâce à la plasticité qui gagne les nervures (Figure 43 et Figure 44).

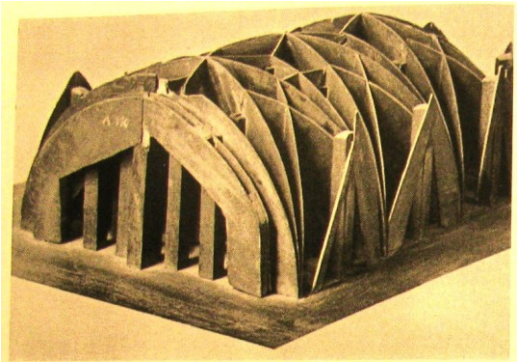


Figure 40. Maquette en bois. Nuremberg. (Bürger, 2007).





Figure 41. Église de Hierschfeld (Bürger, 2007)

Figure 42. Église de Laun. (Nussbaum, 2000)



Figure 43. Église d'Annaberg.



Figure 44. Église de Pirna.

2.2.3 *Espagne*

L'architecture gothique en Espagne commence en suivant des plans d'architectes français : cathédrale de Tolède, de Burgos et de Léon. Tolède et Burgos ont donné les deux grandes écoles des voûtes à nervures du gothique tardif.

Dans la première période gothique qui dure deux siècles et demi (le *Alto Gotico, du* 12ème siècle - moitié du 14ème) il y avait des voûtes d'ogives - en forme de croisée d'ogives, radiales et des voûtes sexpartites. Dans la deuxième période, beaucoup plus courte d'un siècle, on retrouve tous les autres types de voûtes[242].

Alonso Ruiz distingue plusieurs périodes du gothique tardif. Une première période hispano-flamande, introduite par des artistes étrangers provenant du nord de l'Europe. Une deuxième période, du premier quart du 16ème siècle, marquée par le style des fils de ces étrangers, tels que Simón de Colonia (Burgos, c.1451-c.1511), Juan Gil de Hontañón (Rasines, 1480 - Salamanque, 1526) et Juan de Alava (Larrinoa 1480 - Salamanque 1537), les « modernes », « la première génération clairement du gothique tardif espagnol ». Il y eut ensuite une période d'architecture « à la romaine», goût classique de la Renaissance, notamment avec Rodrigo Gil de Hontañón (1500-1577) et Pedro Rasines (1507-1557). La construction de l'Escurial marque la fin du gothique tardif espagnol.[243]

João de Castilho était un contemporain de Juan Gil de Hontañón et d'Àlava. On retrouve des similitudes entre les voûtes de Castilho et celles d'Alava, notamment l'utilisation des *combados* et la continuité d'une forme unifiant les travées.

Les deux écoles- Tolède et Burgos- se caractérisent par deux types de voûtes. L´école de Tolède, influencée par Juan Guas (c. 1430-1496), se caractérise par ses voûtes à nervures rectilignes, des voûtes à tiercerons et à liernes, en forme d'étoile. L'école de Burgos, sous l'influence des Colonia – le père Juan (c. 1410-1481) et le fils Simón – recours aux *combados*, importées d'Allemagne. Les voûtes de type réticulé (*netzgewolbe*) si fréquentes en Europe centrale, étaient rares en Espagne**.**[244]

Exemples de voûte du premier type : voûte de la croisée du couvent de Santa Cruz à Ségovie, de Juan Guas, à quadrilobe rectiligne (Figure 45) ; voûtes du second type : croisée de la cathédrale de Palencia (annexe ES2), à quadrilobe à *combados*. Toutes deux datent du début du 16ème siècle. Toujours du second type : la voûte de l'abside de la cathédrale de Palencia (Figure 46), de Juan de Alava,

[242] www.bovedasgoticasdecruceria.com

[243] ALONSO RUIZ, Begoña, *Arquitectura tardogótica en Castilla: los Rasines*, Universidad de Cantabria/Colegio de Arquitectos de Cantabria, Santander, 2003, pp.27-28.

[244] EALO DE SÁ, María, *El arquitecto Juan de Castillo: el constructor del mundo*, col. Alberto Luna, Santander : Colegio Oficial de Arquitectos de Cantábria, 2009, p. 154.



Figure 45. Voûte à liernes.
Croisée du couvent de Santa Cruz à Ségovie, de Juan Guas.
(www.bovedasgoticasdecruceria.com)



Figure 46. Voûte à *combados*.
Abside de la cathédrale de Palencia, de Juan de Alava.
(www.bovedasgoticasdecruceria.com)

« un véritable maître des combados ».[245]

Palacios divise les voûtes à *combados* en deux groupes : celles à dessin central organisé autour de la clef centrale (cathédrale de Salamanque, de Rodrigo Gil) et celles à réseau de nervures secondaires et qui se prolongent entre les travées, une particularité d'Alava (comme la voûte du couvent de San Esteban). [246]

La nervure courbe, introduite en Espagne par Juan de Colonia est le trait le plus caractéristique des voûtes espagnoles.

Burgos, avec son école, a dû influencer toute la région nord de l'Espagne, où les voûtes à *combados* sont les plus nombreuses. La plupart des églises que nous avons visitées dans la région natale et de formation de Castilho le confirme.

Les combados prennent souvent la forme de quadrilobe en accolade. On le trouve aux églises d'Arnuero-Noya (annexe ES5-ES9), Santa Maria del Puerto à Santoña (annexe ES4). La forme des *combados* est utilisée par Castilho à la sacristie de Jerónimos et à l'église du couvent du Christ de Tomar.

Rodrigo Gil de Hontañón utilise souvent ces formes de *combados* à quadrilobe. Nous remarquons que la voûte du chœur de la cathédrale de Ciudad Rodrigo est similaire en plan à celle du chœur de Braga. La principale différence se trouve au niveau de la ligne faîtière et de la forme cupulaire qui acquiert celle de Braga et pas celle ci.

Nussbaum fait remarquer le caractère hybride de l'architecture allemande, qu'il reconnaît à Juan de Colonia pour la cathédrale de Burgos, notamment pour la façade et dans la *perforation* des voûtes. Il a transmis à sa loge ce caractère hybride, qu'on retrouve chez Simon de Colonia dans la transparence de la voûte de la chapelle du

[245] PALACIOS GONZALO, José Carlos, *La canteria medieval. La construcción de la bóveda gótica española,* Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2009, p.77-79.

Connétable (*Condestable*), et à la cathédrale de Burgos (annexe ES.1), dans les voûtes de la chapelle de la Présentation et de la croisée. La chapelle de la Nativité de San Gil à Burgos (début du 16ème siècle) est similaire, la voûte à tiercerons sur plan octogonal est perforée au centre laissant passer la lumière.[247]

Selon Nussbaum, l'Espagne et l'Allemagne possèdent des typologies de voûtes différentes. Les nervures courbes sont d'influence allemande alors qu'en Espagne les formes en étoile sont toujours délimitées par des réseaux de lignes droites - diagonales et tiercerons – qui ne perdent jamais leur connexion avec les supports. Parmi les voûtes de la cathédrale de Séville, la voûte de la chapelle Antigua, normalement attribuée à Simon de Colonia est la seule qui semble avoir été projetée par une loge d'Allemagne méridionale. Cependant, l'auteur préfère attribuer cette voûte à Alonso Rodriguez puisque, bien que Colonia fût présent à Séville entre 1495 et 1498, son nom n'apparaît toutefois pas dans le cahier des comptes de la cathédrale pour ces années.[248]

En effet, la *Capilla Antigua* est un exemple de voûte composée de plusieurs étoiles (quatre) comme celles du carnet de WG (Figure 47). Les nervures se croisent avant d'aboutir au sommet et forment



Figure 47. Voûte à nervures composées.
Chapelle Antigua de la cathédrale de Séville.
(www.bovedasgoticasdecruceria.com)

quatre croisés et quatre étoiles, comme s'il s'agissait d'un plan de quatre travées. Simón de Colonia a encore utilisé ce type de voûtes à la cathédrale de Salamanque, où il a rajouté des *combados* quadrilobés en accolade (annexe ES3).

Nous trouvons d'autres voûtes similaires, à quatre étoiles : la voûte de la croisée de l'hôpital Santiago de los Reys Católicos (annexe ES17).

À l'église de Santa Maria del Puerto à Santoña, la voûte du chœur est aussi composée d'un plan à quatre carrés et quatre étoiles. La voûte de la croisée est composée de six carrés et six étoiles (annexe ES4).

[247] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in La Piedra Postera. Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, p. 212.
[248] NUSSBAUM, Norbert, "Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in La Piedra Postera. Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007, Vol. 1, p. 230.

Le plan de ces voûtes n'est pas sans rappeler le transept de Jerónimos, où Castilho a créé un plan sur six étoiles.

Soulignons également un aspect important de l'architecture espagnole : la création du narthex à l'entrée de l'église par l'ordre religieux des Hiéronymites (*Jeronimos*). L'introduction du narthex a débouché sur un type de voûte surbaissée qui recourt aux nervures en anse de panier pour dégager la visibilité dans la nef[249]. Ce type de voûtes surbaissées est fréquent en Espagne ainsi qu'au Portugal, pays dans lequel le roi Dom Manuel était le protecteur de l'ordre hiéronymite

Les voûtes espagnoles sont en général assez bombées, avec, vers la Renaissance, une courbure qui devient plus accentuée tendant vers une forme cupulaire. Les lignes faîtières sont courbes dans les deux axes. Cela produit des travées bien délimitées, même dans les églises-halles. Le goût pour les voûtes bombées n'était pas récent. Entre 1150 et 1220, l'Espagne construit des voûtes du type angevin et aquitain. Garcia indique 20 exemples, qui sont surtout localisés dans le quartier nord-ouest de l'Espagne. Deux exemples en sont la voûte du transept de la cathédral Vieja de Salamanca (type aquitain à rangées concentriques) et la voûte de la nef de la cathédrale de Zamora (type angevin à rangées parallèles).[250]

La plupart des voûtes espagnoles du 16ème siècle sont de forme cupulaire, leurs nervures sont disposées selon une surface sphérique de diamètre égal à la diagonale de la voûte. Tous les exemples du manuscrit de Rodrigo Gil relèvent de ce genre de voûtes.[251]

Dans les traités espagnols, la ligne faîtière est dénommée *rampante*, lequel peut être horizontal - *llano* – lorsque la clef du formeret est à la même hauteur que la clef du centre, ou courbe - *redondo* - lorsque les clefs latérales sont situées plus bas que la clef centrale.[252]

Palacios considère que le tracé de la ligne faîtière constitue une évolution des premières décennies du 15ème siècle. Les voûtes à *rampante plano* reprennent le type de voûte française classique à croisée en plein cintre et à transversales de même arc en tiers points dont la clef est légèrement plus basse ; la section de la ligne faîtière est presque horizontale. Dans les voûtes sexpartites, on surhaussait la naissance des arcs pour remonter la hauteur des clefs. En Espagne

[249] PALACIOS GONZALO, José Carlos, "Las bóvedas de crucería españolas de los siglos XV y XVI", in *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción,* Sevilla, 26-28 octubre 2000, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU, Sevilla, 2000, v. II, pp. 745-746.

[250] GARCÍA, Esther de Vega, « Angevinas o aquitanas? Bóvedas cupuladas protogóticas en Castilla-León », in *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, 26 – 29 Octubre, 2011, Universidad Politecnica de Valencia, SANTIAGO HUERTA, Fernandez, et al. (ed.), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 1439.

[251] HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "Technical challenges in the construction of gothic vaults: The gothic thoery of structural design", in: *Construction Techniques in the Age of Historicism. From Theories of Gothic Structures to Building Sites in the 19th Century*, U. Hassler, Ch. Rauhut y S. Huerta, eds. München: Hirmer, 2012, pp. 175.

[252] RABASA DÍAZ, Enrique, CASTELLANOS MIGUÉLEZ, Agustín; Centro de Los Olícios de Léon, *Guía práctica de la estereotomía de la piedra*. Centro de los Oficios de León. León. 2007, p.241.

(et en France) on n'utilisait pas la ligne horizontale pour relier longitudinalement les travées, comme en Angleterre ou en Allemagne. Viollet Le Duc considère que les voûtes aquitaines à *rampante redondo*, sont une manifestation *provinciale*. Ces voûtes sont quasi-sphériques. Leurs voussoirs sont disposés en cercle et sont plus faciles à décorer avec des *combados*.[253]

Navarro Fajardo indique encore une troisième catégorie de voûtes, désignée par Rodrigo Gil de voûtes à *rampante doble* - *rampante* longitudinal horizontal et *rampante* transversal courbe (*redondo)* - ce dernier étant considéré par l'auteur comme étant tracé en arc de cercle. Dans ce type de voûtes, les formerets sont centrés plus bas que les doubleaux. À de rares exceptions, les croisées sont en arc de cercle. Le choix du *rampante* était un sujet de discussion entre les maîtres du 16ème siècle : groupes ne faveur de la ligne horizontale (Juan de Alava, Juan de Badajoz el Viejo et Francisco de Colonia) et groupes pour la ligne courbe, *redonda* (Juan Gil de Hontañón, Juan de Resines et Enrique Egas). La ligne faîtière horizontale relève du gothique classique, la faîtière courbe date de la fin du 15ème siècle, une solution innovatrice *à la romaine*. Le tracé des montées suit la ligne faîtière qui commandait les sections de tous les arcs de la voûte. Concernant le tracé de la ligne faîtière, l'auteur observe qu'on ne connaît pas de dessins établissant un rapport entre le plan et l'élévation de la voûte avant le 16ème siècle.[254]

La définition préalable de la ligne faîtière constituait le moyen de contrôler la forme au moment du projet et de la construction.

Ce croisement entre Gothique et Renaissance est un phénomène naturel en période de transition[255]. Les voûtes adoptent une forme Renaissance en coupole, mais la technique de construction reste gothique et fondée sur un système de construction recourant aux nervures.

Nous retrouvons ces indices de transition chez Vandelvira. Dans son traité (1575-1591), celui-ci défend le type de voûtes à rangs concentriques, *la montea en vuelta de horno*, anticipation des voûtes *à la romaine*[256]. Cependant, il utilise les nervures pour contrôler la

[253] PALACIOS GONZALO, José Carlos, *La canteria medieval. La construcción de la bóveda gótica española,* Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2009, pp. 745-748.

[254] NAVARRO FAJARDO, Juan Carlos, *Bóvedas Valencianas de cruceria de los siglos XIV al XVI. Traza y montea*. Ed: Universitat de Valencia. Servei de Publicacions, 2004, pp. 102-103.

[255] MARTINEZ, Javier Raposo, "Terminologia arquitectónica del Libro III del De Architectura de Vitruvio en la primera edición española de 1582 de Miguel de Urrea", in *Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Santiago de Compostela* 26-29 octobre 2011, eds. S. Huerta, I. Gil Crespo, S. García, M. Taín. Madrid, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 1157. La diffusion des livres de Vitruve en Espagne survient à l'époque du roi Phillipe II, très tard comparé à d'autres pays tels que l'Italie (1515), la France (1547) ou l'Allemagne (1548). Lázaro de Velasco, maître de la cathédrale de Grenade, en a traduit le texte, mais il n'a pas été publié. La publication des *Dix livres d'Architecture* en espagnol, par Miguel de Urrea, date de 1582. Les Principes de Vitruve ont cependant été difusés avant, en 1526, par Diego de Sagredo (Burgos, c. 1490 – Tolède, c. 1528) dans son ouvrage *Medidas del Romano*.

[256] EALO DE SÁ, María, *El arquitecto Juan de Castillo: el constructor del mundo*, col. Alberto Luna, Santander : Colegio Oficial de Arquitectos de Cantábria, 2009, p. 155

forme. Dominguez étudie les voûtes sur plan irrégulier de Vandelvira et il conclut que leur forme est déterminée par la forme des nervures. Cet auteur remarque la réticulation en carré qui permet de transformer un arc de cercle en ovale par déformation de la trame. Ceci peut être comparé aux dessins d'Albert Dürer (1528) pour tracer un visage en position non frontale.[257]

Tracé et construction

Deux sources de l'époque nous ont été fondamentales pour comprendre le tracé et la construction des voûtes à nervures, respectivement celles des architectes Hernán Ruiz (1500-1569) et de Rodrigo Gil de Hontañón (1500-1577), contemporains de João de Castilho. Le traité de Rodrigo Gil de Hontañón comporte aussi des règles arithmétique et géométrique, pour dimensionner les éléments structurels, inclus les nervures, qui assurait la stabilité. Ces règles seront analysées séparément.

Tracé des nervures de Hernán Ruiz.

Le *Cahier de Hernán Ruiz « el Joven »* (1545-1566) reprend le tracé en plan et en élévation d'une voûte à tierceron en étoile. La forme de

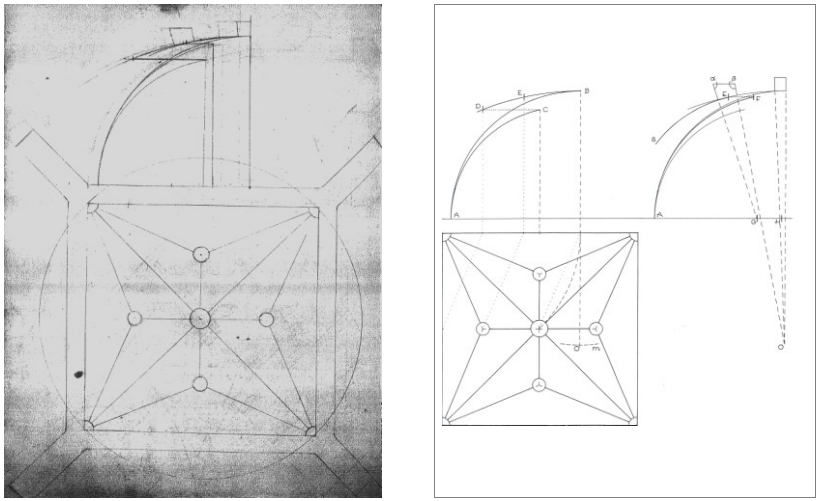


Figure 48. A. Tracé de Hernán Ruiz pour une voûte à tiercerons en étoile.
B. Interprétation de Rabasa Diaz (Rabasa Díaz, 2000)

la voûte est définie par la ligne faîtière courbe qui détermine la position des clefs et la forme des arcs formerets et des tiercerons (Figure 48A).

Rabasa Díaz [258] explique le tracé et il commente les diverses tentatives de Hernán Ruiz pour tracer des arcs et des formerets naissant au même niveau. Diaz analyse la géométrie et conclut que le rayon de la ligne faîtière est égal à la longueur de la diagonale en

[257] DOMINGUEZ, Rosa Senent, "Las bóvedas irregulares del tratado de Vandelvira. Estrategias góticas en cantería renacentista", in *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción,* 26 – 29 Octubre, 2011, Universidad Politecnica de Valencia, SANTIAGO HUERTA, Fernandez, et al. (ed.), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 1336-1338.

[258] RABASA DÍAZ, Enrique, *Forma y Construcción en Piedra. De la cantería Medieval a la Stereotomía del siglo XIX*, Ediciones Akal, Madrid 2000, pp.126-128. Diaz indique que les tracés sont blancs et après ensuite à l'encre.

plan et que les nervures sont toutes de rayons différents (fig. 81B). Dès lors, la méthode de ce projet (ou l'ordre du tracé) serait de:

- Tracer le plan.

-Tracer, en élévation, l'arc en demi-cercle sur la diagonale AC.

- À partir de la clef principale, tracer la ligne faîtière de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan.

- Sur la ligne faîtière, déterminer l'emplacement des clefs des formerets et des tiercerons.

- Pour dessiner ces nervures en élévation, on reprend les hauteurs de leurs clefs, depuis la ligne faîtière, et leur longueur en plan.

Dans le tracé de Ruiz, la ligne directrice de la nervure est à l'intrados, ce que Rabasa considère être courant à l'époque, une solution qui fut reprise dans presque tous les traités. Rabasa relève un inconvénient de ce tracé : si les nervures ont des rayons différents, certaines d'entre elles se dégagent du tas-de-charge plus bas que d'autres et les voûtains entre elles changent brusquement de niveau en se croisant à la clef.[259]

Diaz commente que la technique de dessin d'Hernán Ruiz, avec la façade au-dessus du plan est courant, mais qu'il ne s'agit pas d'une projection orthogonale, qui n'apparaîtra qu'au début du 16ème siècle en Italie. Les tracés pour tailler la pierre sont à l'origine du système diédrique de Monge – deux projections sur plan horizontal et sur plan vertical - et de la géométrie descriptive[260].

Pour simplifier la taille, il faut que les pièces soient positionnées verticalement afin que les intersections soient elles aussi verticales. Ainsi, les claveaux sont toujours verticaux, produisant des plans obliques de nervures et de clefs (*revirado* en espagnol). Les deux zones d'intersection les plus importantes sont les clefs et les tas-de-charge. La clef est toujours horizontale à l'extrados et le tas-de-charge est horizontal dans les sommiers. Il suffit de connaître le plan et l'élévation de chaque nervure pour contrôler la stéréotomie de l'ensemble de la voûte.

Notons une particularité du tracé de Ruiz caractéristique des voûtes espagnoles du gothique final : la ligne faîtière a une forme précise et son rayon est égal à la longueur de la diagonale en plan. C'est la ligne de faîte qui commande la hauteur des clefs et le tracé des nervures et qui va donner la forme principale de la voûte.

Méthode de construction. Rodrigo Gil de Hontañón et Gelabert

Rodrigo Gil de Hontañón explique la construction d'une voûte à

[259] RABASA DÍAZ, Enrique, CASTELLANOS MIGUÉLEZ, Agustín; Centro de Los Olícios de Léon, *Guía práctica de la estereotomía de la piedra*. Centro de los Oficios de León. León. 2007, p.87.

[260] RABASA DÍAZ, Enrique, CASTELLANOS MIGUÉLEZ, Agustín; Centro de Los Olícios de Léon, *Guía práctica de la estereotomía de la piedra*. Centro de los Oficios de León. León. 2007, p.227. JUAN CARLOS NAVARRO FAJARDO, *Bóvedas Valencianas de cruceria de los siglos XIV al XVI. Traza y montea*. Ed: Universitat de Valencia. Servei de Publicacions, 2004, p. 101. Selon Navarro, avant le 16ème siècle on ne connaît pas des dessins qui font le rapport entre le plan et l'élévation des arcs.

nervures. Sur la plateforme de travail, il trace le plan d'une voûte à *combados* espagnole typique. L'élévation représente l'arc diagonal en demi-cercle et les tas de charge jusqu'au dernier sommier incliné à partir d'où sont placés les cintres des nervures depuis la plate-forme de travail (s). Deux étais servent à poser les clefs – la clef centrale est verticale et la clef intermédiaire est inclinée (Figure 49).

Nous retranscrivons ici partiellement le texte de Rodrigo Gil de Hontañón, qui est une riche source d'information concernant la méthode de construction des voûtes nervurées :

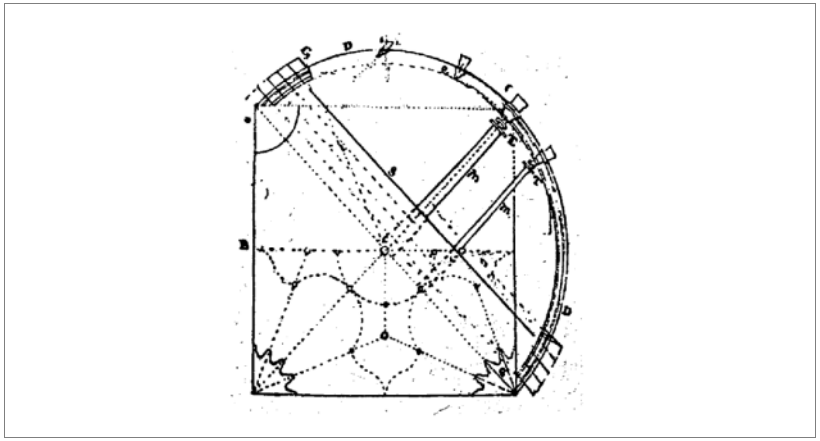


Figure 49. Dessin de Rodrigo Gil de Hontañón.
Le dessin représente le cintrage pour la construction d'une voûte à *combados* : la plateforme de travail avec le tracé du plan ; en élévation, les tas-de-charge jusqu'à G, le cintre de la diagonale et deux étais pour la clef centrale, et la clef intermédiaire secondaire en position inclinée (GARCIA, Simon, 1681).

« (…) Et pour que cette matière tellement importante soit bien expliquée, avec des exemples, je ferai une démonstration, pour qu'on comprenne ceci autant que possible, bien que ces choses puissent être difficiles à comprendre parce qu'il manque à ceux qui les cherchent l'expérience de la pratique (…) pour tirer les cordes et couper les étais des clefs à la hauteur que chacune nécessite, pour prendre les tas-de-charges, et poser chaque membre sur sa ligne en respectant sa courbure (…) m.m sont les étais ou pieds droits, pour poser les clefs avant toute ogive. Pour les couper à la hauteur qu'elles requièrent, on les prend de cette manière : l'échafaudage se place au niveau où on commence à déplacer les cintres, cela veut dire la diagonale GC en plan. Et parce que là ce sera bas, pour monter les tas de charge avec ses avancements plus hauts. Et on n'arrivera pas à placer les ogives sur eux, on fera un deuxième échafaudage comme S. Et celui-ci revêtu de fortes planches sur lesquelles on peut tracer, délinéer, et faire la montée, toute la croisée ni plus, ni moins de ce qu'on voit en plan. Ceci fait, et une fois signalées toutes les clefs à leur place, faire pendre au-dessus du plancher les fils à plomb, depuis le cintre, ceci pour celles qui sont sur les ogives ou diagonales. Mais pour les étais de toutes les autres clefs on fera ainsi : une fois posé la clef centrale à sa hauteur, faire une cerce assez grande pour aller de B à C c'est à dire depuis le pied de poule jusqu'à la clef centrale avec le cintre de la diagonale. Et à partir de ces cerces, faire pendre des fils à plomb aux clefs qui sont

signalées sur les planchers, et cela donnera la longueur de chaque étai (...)[261]. »

Rodrigo Gil explique comment la voûte était construite et il est intéressant de constater que l'ordre de construction qu'il utilise est le même que celui du tracé de Hernán Ruiz - le plan, la diagonale, la ligne faîtière, les clefs et les nervures :

- Tracé du plan sur la plateforme de travail.

-Pose du cintre de la diagonale où sont placées les clefs au fil à plomb, à la verticale de leurs positions portées sur la plate-forme.

- À partir de la clef centrale, on place une cerce correspondant à la ligne faîtière jusqu'au « pied de poule » (*pié de gallo*), expression qui désigne selon nous la clef à branches du formeret.

- On détermine l'emplacement des clefs sur cette ligne au fil à plomb des points marqués sur la plateforme de travail et on place les étais correspondants.

- Pose des cintres jusqu'aux étais précédents.

On notera que le but principal de cette opération de cintrage est de trouver la hauteur des clefs pour ensuite couper et poser les étais à la bonne hauteur. La hauteur des clefs n'est pas déterminée par un tracé préalable, mais elle est décidée sur place. D'ailleurs tout semble être déterminé sur place même les tas de charges. D'après le deuxième paragraphe, on tire d'abord les cordes pour trouver l'emplacement des différents éléments, on trouve les hauteurs des clefs et ensuite on « prend » les tas de charge (*sacar las jarjas*). Peut-être que le tracé en élévation, la *montée*, nécessaire pour prendre les patrons du tas de charge, était effectué parallèlement

[261] GARCÍA, Simón, *Compendio de arquitectura y simetría de los templos: conforme a la medida del cuerpo humano: con algunas demostraziones de geometria. Año de 1681. Recoxido de dibersos autores, naturales y estrangeros. Por Simón Garcia. Architecto natural de Salamanca. 1681*, Ed. Antonio Bonet Correa y Carlos Chanfón Olmos, Colegio Oficial de Arquitectos en Valladolid, Valladolid, 1991, pp. 67-68. Folha 24 e 25. Texte original: *« (...) Y porque esta matéria que tanto importa, quede bien esplicada, Y exemplificada, pondré a la buelta una demostracion, en que se entienda esto cuando me sea posible, aunque estas cosas, podran ser dificiles de comprehender faltando en quien las procura la experiencia la practica (...) para el tirar de los cordeles para el cortar las mazas de las claves, a el alto que cada una rrequiere, para sacar los jarjamentos, Y abançar cada miembro por su línea como le toca Respecto de su buelta (...) m.m son las maças o pies derechos, para asentar las claves antes que crucero alguno. Para cortar-las al alto que requieren, se les toma en esta manera, el andamio se açe al nibel de donde comiençan a mober las bueltas, que significa la diagonal de la planta GC. Y porque alli estará vajo, por allarse los jarjamentos com sus abançamentos mas altos. Y no se alcançara a asentar los cruzeros sobre ellos, se ará outro segundo andamio como S. Y este tan quajado de fuertes tablones, que en ellos se pueda traçar, delinear, y montear, toda la cruceria ni mas, ni menos de lo que se ve en planta. Esto echo y señaladas todas las claues en su lugar sobre los tablones dejar caer perpendiculos, de la buelta a ellas, esto es para las que están en los cruzeros o diagonales. Mas para las maças de todas las otras se ará assi. Puesta la clabe maior al alto que le toca, aras una çercha tan larga que alcance desde B. a C. que es desde el pie de Gallo a la claue maior com la buelta de la diagonal. Y desde estas zerchas dejar caer plomos a las claues que estan señaladas en los tablones, y aquello será el largo de cada maça (...)*

avec ce travail de cintrage.[262]

Si on admet que tout était fait sur place, le projet pouvait être extrêmement succinct. Par ailleurs, les nervures étaient standardisées. Dans cette voûte de Gil, même la courbe de la ligne faîtière était égale à celle de la diagonale. L'auteur du projet devait toutefois déterminer la hauteur de la clef centrale (ou du formeret), tracer le plan et une courbe, sans plus.

Un autre indice de simplification de la construction est la taille des profils des nervures au niveau du tas de charge qui reprenait les mêmes modèles utilisé pour le profil des nervures. Dans son traité, Gelabert observe que la différence de profil est minime entre des nervures et leurs projections horizontales sur les tas de charge[263].

Rabasa Diaz explique que, pour tailler le tas de charge, il suffit de tracer des lignes schématiques du plan, de dessiner sur la pierre les lignes droites convergentes qui représentent le plan moyen de la nervure et son profil. On mesure ensuite la distance entre l'intrados de la nervure et l'axe de la portée sur l'élévation de chaque arc. Cette distance pouvait ensuite être reportée sur la pierre. De manière naturelle, les lignes des nervures forment des intersections et fusionnent ensemble sans qu'il y ait besoin de faire un dessin préalable. Les sections obliques ou horizontales ne sont pas égales, mais les bâtisseurs gothiques se souciaient peu de ce genre d'irrégularités qui restaient très discrètes.[264]

À l'instar de Rodrigo Gil, Gelabert s'en remet aux contraintes pratiques pour expliquer la construction. Son traité est le seul document original qui décrit la construction des voûtains. En Espagne, et en particulier en Castille et à Valence, dès avant la moitié du 16ème siècle, les rangs de voûtains n'étaient plus posés sans ordre, mais ils étaient constitués de voussoirs uniques, soigneusement taillés, posés de nervure à nervure, ou alors composés de deux ou trois voussoirs. Le traité de Gelabert indique que les nervures étaient divisées et marquées en longueur avec la dimension des voussoirs à poser, ces derniers étant taillés avec une légère courbure à leur intrados.[265]

[262] La « montée » est le dessin à l'échelle 1/1 d'une voûte, exécuté au sol ou sur un mur, pour prendre des mesures et les formes de ses différentes parties, ou pour en tirer les patrons. Garcia Salinero, Fernando, dans son *Léxico de alarifes de los siglos de oro*, attribue son étymologie au français montée, « subida », « alzado ». La première mention écrite du mot date du début du 16ème siècle. Zaragoza nous informe qu'à Valence, les montées étaient des dessins normalement schématiques tracés sur du plâtre appliqué sur les murs. ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo, "El Arte de corte de piedras en la arquitectura Valenciana del cuatrocientos: un estado de la cuestión", in *Archivo de Arte Valenciano*, nº 89, Real Academia de Bellas Artes de San Carlos, Valencia 2008, pp. 20-32

[263] RABASA DÍAZ, Enrique, *"De l'art de picapedrer (1653) de Joseph Gelabert, un manuscrito sobre estereotomía que recoge tradiciones góticas y renascentistas",* Burgos, 7-9 de juin 2007, Instituto Juan de Herrera, M. Arenillas, C. Segura, F. Bueno, S. Huerta, SEdHC, CICCP, CEHOPU, Madrid 2007, p. 749.

[264] RABASA DÍAZ, Enrique, *Forma y Construcción en Piedra. De la cantería Medieval a la Stereotomía del siglo XIX*, Ediciones Akal, Madrid 2000, pp. 101-103.

[265] RABASA DÍAZ, Enrique, *"De l'art de picapedrer (1653) de Joseph Gelabert, un manuscrito sobre estereotomía que recoge tradiciones góticas y renascentistas",* Burgos, 7-9 de juin 2007, Instituto Juan de Herrera, M. Arenillas, C. Segura, F. Bueno, S. Huerta, SEdHC, CICCP, CEHOPU, Madrid 2007, pp. 752.

Analyse des tracés de voûtes

Les proportions de plan les plus usitées en Espagne sont indiquées dans le manuscrit de Simon Garcia, qui part de la proportion 1:2 (proportion double). En ajoutant une unité au dénominateur de la fraction précédente, on obtient les autres : 2:3 (*sesquialtero*), 3:4 (*sesquitercia*, un rectangle formé de deux triangles rectangles dont la diagonale est égale à 5, le triangle de Pythagore, qui était facilement tracé avec une corde à 11 nœuds), 4:5 (rectangle *sesquicuarto*), 5:6 et successivement. Pour trouver la position du tierceron, la méthode la plus courante consistait à tracer la bissectrice entre le formeret et la diagonale ou à partir d'une trame, méthode allemande utilisée pour les voûtes plus complexes.[266]

Dans le tracé en élévation, on retrouve souvent la standardisation des nervures dans la plupart des voûtes espagnoles. Le but visé était de simplifier la construction.

Un exemple extrême et bien antérieur à cette époque, est celui de la voûte sexpartite du monastère de Santa Maria de Huerta, construite entre 1215 et 1255, dont les nervures sont à claveaux plats. Les nervures forment la courbe à travers un système de coins en bois posés dans les joints des voussoirs[267].

Voyons à présent les tracés des voûtes espagnoles tel que proposé par José Carlos Palacios dans son dernier ouvrage, dont quelques-uns sont disponibles sur Internet avec des expériences de construction de maquettes[268].

Une des premières maquettes qu'il a réalisées était celle de la voûte sphérique de Vandelvira (Figure 50). Le tracé de cette voûte présente un arc diagonal en demi-cercle avec des tiercerons et des formerets de rayons différents centrés au niveau de l'imposte. La hauteur des clefs est déterminée par la ligne faîtière de même rayon que la diagonale. Pour que les nervures restent verticales, elles adaptent leur forme en fonction de leur localisation. Les nervures ont toutes un queutage saillant à l'extrados, comme chez Rodrigo Gil et incorporé dans la maçonnerie, y compris les combados.[269]

À propos du traité de Vandelvira (1580), Palacios constate une divergence entre la théorie et la pratique dans le cas des voûtes à caisson, type de voûte qui est considéré constituer une adaptation de la voûte à nervures à la forme Renaissance (sphérique). Dans le traité, ces voûtes sont toutes sphériques, ce qui suppose que les

[266] PALACIOS GONZALO, José Carlos, *La canteria medieval. La construcción de la bóveda gótica española,* Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2009, pp. 85-87.

[267] VIDAL, Rocio M., "Bóvedas sexpartidas: traza, estereotomía y construcción. Monasterio de Santa Maria de Huerta", in *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción,* 21 – 24 Octubre, 2009, Universidad Politecnica de Valencia, SANTIAGO HUERTA, Fernandez, et al. (ed.), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2009, pp. 830-831.

[268] www.bovedasgoticasdecruceria.com

[269] PALACIOS GONZALO, José Carlos, *La canteria medieval. La construcción de la bóveda gótica española,* Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2009, pp. 93-96.

nervures sont constituées de différents arcs de cercle. Cependant, dans l'exemple, tous les arcs sont égaux.

Nous avons repris les données des voûtes analysées par Palacios sous forme de tableau et nous avons comparé les résultats des tracée par auteur. Le but était de déterminer les influences sur Castilho, notamment celles de Simón de Colonia, avec qui il a travaillé, et de Juan Guas, qui est parfois cité dans la bibliographie portugaise pour avoir eu une influencé sur les voûtes de l'église de Jerónimos de Lisbonne.

Voyons les voûtes attribuées à Simon de Colonia. Pour les trois voûtes étudiées par Palacios, les plans sont tracés à partir d'une trame. À la cathédrale de Palencia (annexe ES2), la voûte de la croisée présente deux lignes faîtières en arc de cercle qui déterminent les hauteurs des tiercerons. Les tiercerons sont tracés avec l'arc de cercle de la diagonale et les autres nervures avec des rayons différents. Dans la voûte de la chapelle de l'Immaculée conception, les faîtières sont brisées et c'est le carré central formé par des liernes horizontaux qui détermine la hauteur des nervures. La chapelle d'Antígua (Figure 51.), possède des nervures composées, formant quatre étoiles au croisement des liernes et des diagonales. Le plan est similaire à celui de la voûte du transept de Jerónimos. La diagonale est un arc brisé et les deux tiercerons sont des arcs identiques à celui de la diagonale. Les lignes faîtières sont deux courbes brisées (Figure 52).

Talaverano constate que la méthode de Colonia, commune en Allemagne, permet de déterminer la hauteur des clefs et de poser ensuite les nervures entre celles-ci. La communication sur le chantier serait beaucoup plus facile que lorsque la forme était définie par la courbe des nervures.

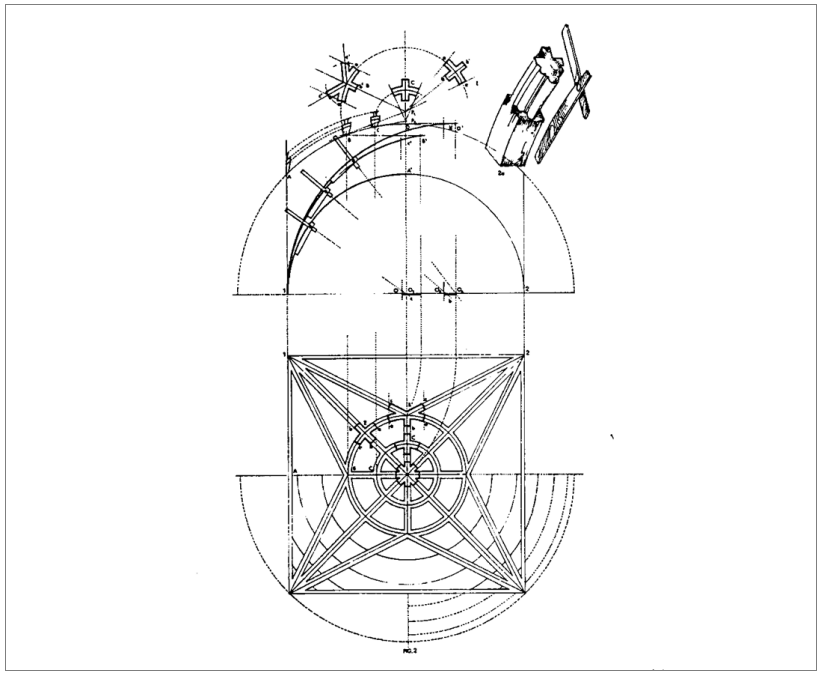


Figure 50. Tracé des nervures de la voûte sphérique de Vandelvira.
L'arc diagonal est en demi-cercle et les tiercerons et les formerets de rayons différents ont leurs centres au niveau de l'imposte. Les hauteurs des clefs sont prisent à partir de la ligne faîtière, qui a le même rayon que la diagonale (Palacios Gonzalo, 2009)

Cependant, dans son étude du tracé de la chapelle d'Antigua à Séville, il ne trouve pas les méthodes de tracé allemandes. Les nervures ne sont pas toutes identiques et le tracé à partir de l'arc diagonal (l'arc principal, à partir duquel les hauteurs de clefs sont prises), ne constitue pas une méthode valable pour déterminer la

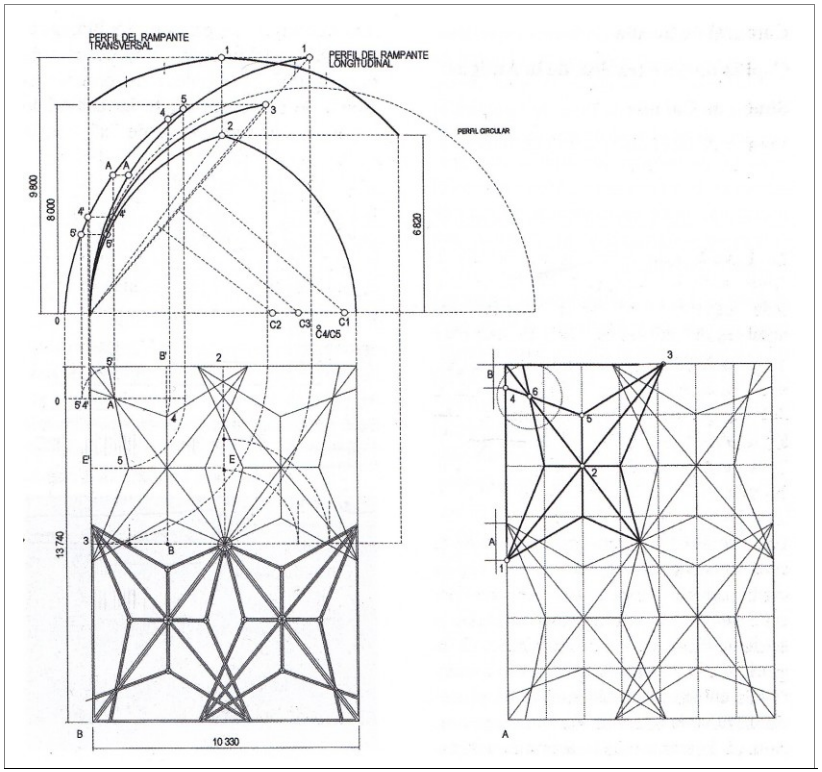


Figure 51. Cathédrale de Séville, chapelle Nostra Senhora de la Antígua. Tracé en plan et en élévation (Palacios, 2009).

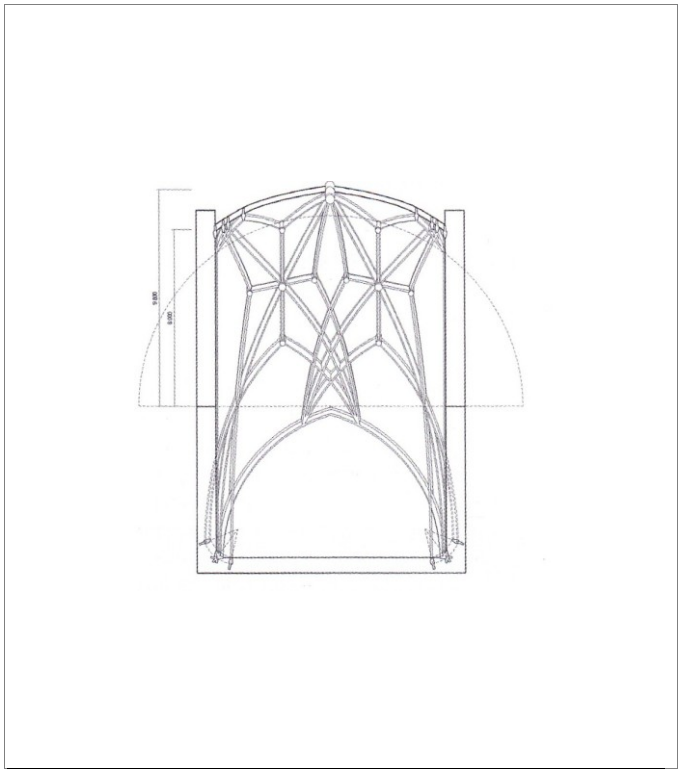


Figure 52. Cathédrale de Séville, chapelle Nostra Senhora de la Antígua ; section transversale.

hauteur des clefs des tiercerons, puisque ceux-ci sont plus élevés. [270]

Notre interprétation du tracé de la voûte de la chapelle d'Antígua de Séville est la suivante : la courbe de la ligne faîtière transversale a pu être tracée avec un seul rayon (Figure 52). Cette ligne détermine la hauteur de formerets (clefs 2 et 3) et de l'ogive principale (clef 1). La diagonale détermine la hauteur des ogives secondaires (leurs clefs centrales) et celles des tiercerons, mais le point A d'intersection est défini à l'avance, au contraire de la hauteur de la clef. Depuis A partent les nervures de même courbure. Tout cela serait simple à construire suivant cet ordre indiqué pour le tracé de la voûte et en suivant la méthode de Rodrigo Gil de Hontañón.

L'étude des sept voûtes de Rodrigo Gil montre que la plupart des nervures sont des arcs de cercle, l'ovale n'étant utilisé que dans le cas de la voûte de l'église de San Martín, à Valladolid. Dans deux des voûtes, toutes les nervures présentent le même arc : celle du grand collège Fonseca de Saint Jacques de Compostelle (annexe ES16) et celle de la cathédrale d'Astorga. Dans les autres voûtes, les tiercerons ont souvent le même rayon que les diagonales.

Voûtes de Juan Gil de Hontañón : ce n'est que dans le cloître de Palencia que les arcs des nervures sont différents entre eux. Les voûtes de la chapelle Ramos et des nefs latérales de la cathédrale de Salamanque présentent une majorité d'arcs identiques à la diagonale, en demi-cercle. Les faîtières sont normalement courbes.

Les voûtes de Juan Guas sont toutes qualifiées de *rampante redondo*, mais il apparaît que ces lignes faîtières n'ont pas été tracées avec une seule courbe, elles sont brisées – la voûte de la nef du couvent San Juan de los Reys à Toledo, et, à Ségovie, les voûtes de la croisée du couvent Santa Cruz et celle du cloître de la cathédrale. La standardisation est une caractéristique de ces voûtes, les nervures sont constituées d'un ou deux arcs de cercle identiques, même les formerets. Dans deux de ces voûtes – celles du cloître et de la sacristie de Ségovie - les tiercerons sont identiques aux diagonales et les arcs s'inclinent pour atteindre la hauteur de leur clef. Dans la voûte du cloître, la hauteur des clefs est déterminée par un cercle tracé en plan (Figure 53). Concernant la voûte de la sacristie du monastère de Parral, l'attribution à Guas n'est pas certaine ; en effet, cette voûte diffère des autres, car sa ligne faîtière est identique à la diagonale et toutes les nervures ont des arcs différents.

Les voûtes de Juan de Alava ont des lignes faîtières en arc de cercle peu prononcé ou alors horizontales. Ses tracés de voûtes se caractérisent par leur arc principal qui est la diagonale qui sert à toutes les nervures, à l'exception parfois du formeret. Les nervures des voûtes que nous avons analysées sont en arc de cercle, sauf celles du narthex du couvent San Marcos de Léon et du cloître du monastère San Esteban de Salamanque, où on trouve des ovales. La méthode de tracé de ces deux dernières voûtes est identique à celle

[270] TALAVERANO, Rafael Martín, PÉREZ DE LOS RÍOS, Carmen, DOMÍNGUEZ, Rosa Senent, "Late German Gothic Methods of Vault Design and Their Relationships with Spanish Ribbed Vaults", in *Nuts & Bolts of Construction History: Culture, Technology and Society*, Publisher: Picard, Editors: Robert Carvais, André Guillerme, Valérie Nègre, Joël Sakarovitch, 2012, pp. 88-89.

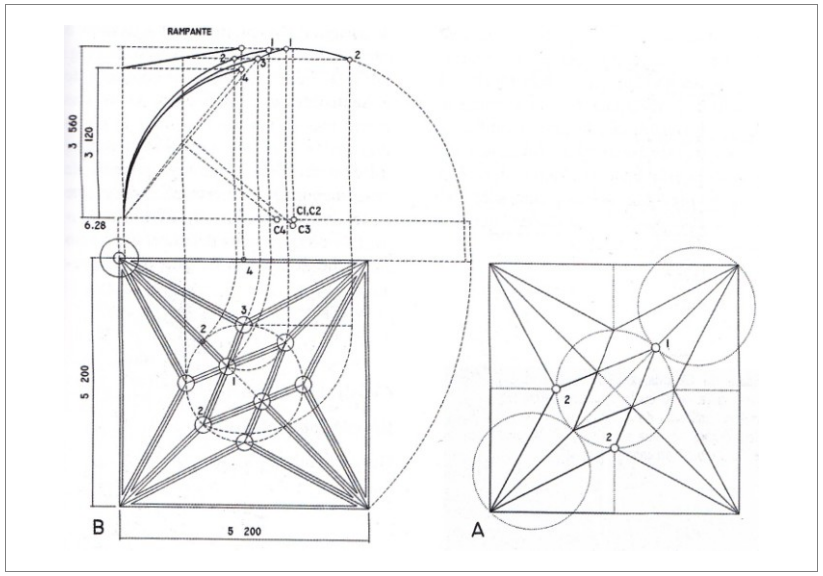
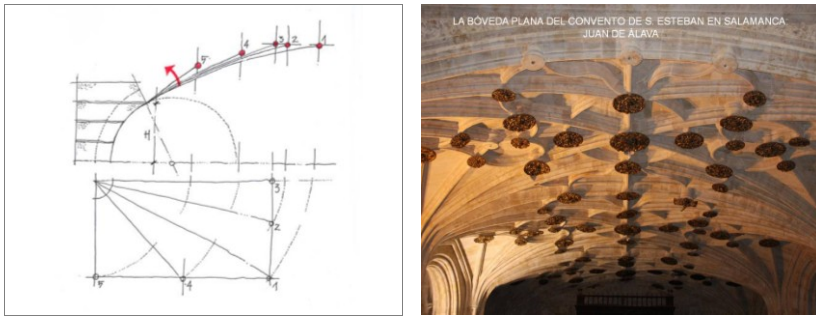


Figure 53. Cathédrale de Ségovie, voûte du cloître, de Juan Guas.
Tracé du plan et élévation. (Palacios Gonzalo, 2009)

des voûtes anglaises. L'arc de plus grand rayon s'incline pour atteindre la hauteur de la clef qui est déterminée par les lignes faîtières. La diagonale est un ovale et les nervures sont toutes construites avec le grand arc de cet ovale (standardisation) (Figure 54).



A B

Figure 54. Voûte du narthex du couvent San Marcos de Léon, d'Alava.
Plan et sections de la voûte (A) et méthode de tracé anglaise de standardisation des nervures (B) (www.bovedasgoticasdecruceria.com).

Règles structurelles

Les tracés et les détails de construction étaient des règles structurelles qui étaient garantes de la stabilité des bâtiments. Il existait des méthodes de calcul pour les murs, les colonnes, les contreforts et les nervures.

Santiago Huerta analyse les règles structurelles, arithmétiques et géométriques reprises dans les traités allemands et espagnols et il vérifie la validité de ces méthodes. Il fait la distinction entre les règles mises en pratique à l'époque et celles provenant des recherches, notamment celles de Rodrigo Gil de Hontañón, pour calculer l'épaisseur des contreforts dans le cadre de la construction

de voûtes en berceau. À ce propos, Huerta affirme que si l'on appliquait les règles gothiques à un bâtiment de la Renaissance, le résultat serait désastreux ; par exemple, les poussées d'une croisée d'ogive gothique peuvent être moindres de moitié comparées à celles d'une voûte en berceau de la Renaissance. Ses études sont extrêmement riches en informations que nous faisons un résumé de ses articles traitant de ce sujet.[271]

Les nervures et clefs

Au sujet du tracé des voûtes, Huerta ajoute que les données sur la courbe des nervures ne portent que sur la croisée, qui est normalement semi-circulaire. Il manque d'information sur les autres nervures dans les traités allemands. Les voûtains ne sont pas dimensionnés. Dans le traité de Rodrigo Gil, toutes les nervures sont en demi-cercle et les voûtes sont de forme cupulaire.

Rodrigo Gil de Hontañón est le seul qui sépare nettement les règles structurelles. Il définit d'abord les proportions de l'église et donne ensuite les règles de dimensionnement des nervures et des clefs pour que la structure reste en équilibre.

Rodrigo Gil dit « il faut dimensionner correctement [les nervures et clefs], puisqu'on a déjà vu des cas de ruine causée par des clefs trop lourdes pour ce que les nervures peuvent supporter; ou des clefs trop légères, de sorte que le poids des nervures soulève les clefs ». Selon Huerta, Rodrigo Gil doit faire référence au moment de construction.

Il compare les nervures aux doigts de la main : le doubleau avec le pouce, la diagonale avec le majeur, les tiercerons et les nervures faîtières avec l'index et l'annulaire, le formeret avec l'auriculaire. (Figure 55). Les dimensions des nervures sont fonction de la portée (p) : nervures transversales p/20, diagonales p/24, tierceron p/28 et formerets p/30. Ces formules s'appliquent aux églises dont la hauteur est égale à la portée. Si la hauteur est plus grande ou plus petite que la portée, on doit ajouter ou retrancher en appliquant une règle de trois. Si la voûte est surbaissée, les sections de nervures augmentent en fonction du surbaissement et on applique aussi la règle de trois. Pour les travées rectangulaires, la valeur de la portée doit être calculée en additionnant les dimensions des deux côtés et en le divisant par deux.

La règle pour dimensionner les clefs est d'interprétation plus complexe. Rodrigo Gil considère le poids de la clef et la longueur des nervures et fait la distinction entre membres « porteurs » et membres « portés ». « Les membres portés doivent être soustraits des membres porteurs. Les nervures porteuses partent des tas de charge et les nervures portées partent des clefs. Il y a aussi des clefs porteuses et des clefs portées. Celles qui se trouvent sur des

[271] HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, *"Technical challenges in the construction of gothic vaults: The gothic thoery of structural design",* in: *Construction Techniques in the Age of Historicism. From Theories of Gothic Structures to Building Sites in the 19th Century*, U. Hassler, Ch. Rauhut y S. Huerta, eds. München: Hirmer, 2012, *pp. 165-172;* HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "Las reglas estructurales del gótico tardío alemán" in: *Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Burgos, 7-9 junio 2007, M.* Arenillas, C. Segura, F. Bueno, S. Huerta, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, CICCP, CEHOPU, 2007, pp. 525.

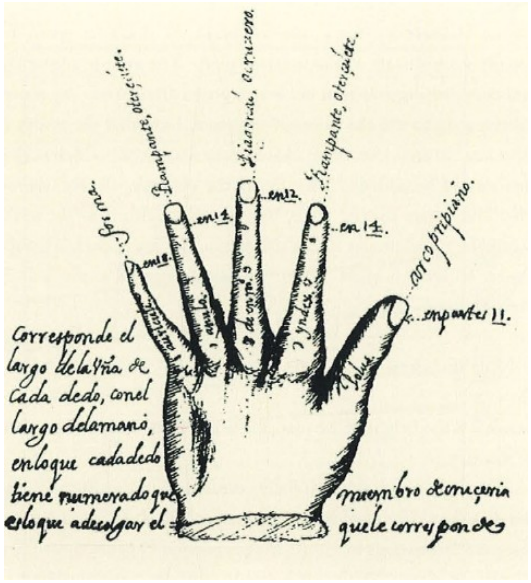


Figure 55. Dessin de Rodrigo Gil de Hontañón. Garcia, Simon, 1681
Les dimensions des nervures sont comparées aux doigts de la main (Huerta Fernández, 2012).

diagonales et des tiercerons sont des clefs portées. Celles qui sont aux extrémités des diagonales et des tiercerons portent toutes les autres ». [272]

Murs et contreforts

Dans les trois traités allemands traduit par Ulrich Coenen (Unterweisungen (Instructions) de Lonrenz Lechler (1516), Von des Chores Maj3 und Gerechtigkeif (vers 1500) et Wiener Wekmeisterbuch (1400-1450), les règles sont les suivantes : les dimensions des murs du chœur dépendent de la portée, normalement l'épaisseur vaut 1/10ème de la portée. La largeur du contrefort est égale à l'épaisseur du mur et son épaisseur est le double de celle du mur.

On détermine les dimensions du contrefort selon la méthode géométrique suivante : on divise l'arc transversal en trois, on trace une ligne entre l'extrémité de l'arc et le point précédent, on prolonge la ligne de la même distance vers l'extérieur; cette distance déterminant l'épaisseur du contrefort. L'épaisseur du contrefort diminue avec la hauteur de l'arc. Cette méthode est également celle qui été indiquée par les architectes espagnols Hernán Ruiz el Joven et Martinez de Aranda (cc. 1600). La règle de Martinez de Aranda

[272] Navarro met en évidence la fonction structurelle des nervures et affirme que Rodrigo Gil ne dimensionne que nervures porteuses – celles qui partent des appuis – et pas les nervures portées (liernes et *combados*) qui n'ont pas besoin de méthode de tracé. NAVARRO FAJARDO, Juan Carlos. *Bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV al XVI. Traza y montea*. Tesis doctoral, Universidad de Valencia, Facultad de Geografía e Historia, 2004, p. 133.

fut publiée pour la première fois par François Derand en 1643 dans « Architecture des voûtes ». Dans le tracé, plus l'arc est surbaissé, plus le contrefort est épais. (Figure 56)

Contrefort des voûtes en berceau

Huerta fait état des difficultés de Rodrigo Gil pour tracer le contrefort d'un arc ou d'une voûte en berceau. « Une simple voûte en berceau était une structure qui lui était étrangère (autant que je sache, il n'en a construite aucune) et il était perplexe. » Rodrigo Gil dit à ce propos : « J'ai très souvent tenté de trouver une logique pour le contrefort qu'il faut pour chaque arc, mais je n'ai jamais trouvé la règle. J'en ai aussi discuté avec des architectes espagnols et étrangers, et aucun ne semble être capable de vérifier une telle règle mais tous suivent leur propre jugement. Quand je demande comment sait-on combien il faut pour le contrefort, la réponse est qu'il en faut *autant*, mais aucune raison n'est donnée. Certains donnent ¼, et d'autres font des tracés en se basant sur certaines lignes orthogonales, et ils n'ont pas le moindre doute sur ce qu'ils font et croient que le contrefort est résistant ». Huerta fait remarquer que le mot *raison* en espagnol ne signifie pas « scientifique » mais plutôt « méthode ». [273]

[273] HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "Technical challenges in the construction of gothic vaults: The gothic thoery of structural design", in: *Construction Techniques in the Age of Historicism. From Theories of Gothic Structures to Building Sites in the 19th Century*, U. Hassler, Ch. Rauhut y S. Huerta, eds. München: Hirmer, 2012, p. 178.

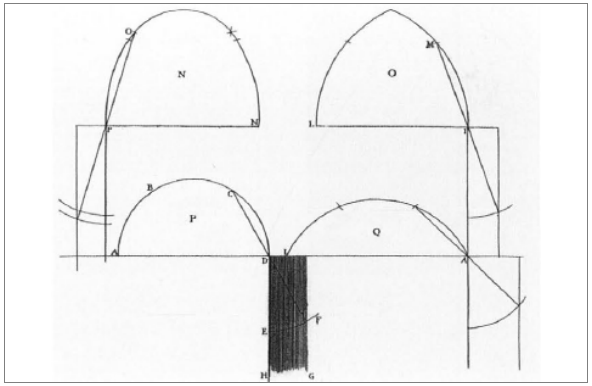


Figure 56. Règle structurelle de Martinez de Aranda. Méthode de dimensionnement de l'épaisseur du contrefort à partir du tracé de l'arc transversal (Huerta Fernández, 2012).

Dans les quatre tracés qu'il présentait, Rodrigo Gil cherchait des méthodes pour les formes Renaissance (Figure 57) et la règle définitive, conclusion de sa recherche, est décrite dans le manuscrit (fol. 59r) : on trace l'élévation de l'intrados de l'arc ou de la voûte en berceau en comptant les piliers ; on trace une ligne de la base du pilier jusqu'à la clef de l'arc ; l'intersection de cette ligne avec la ligne de l'imposte donne un point ; la distance de ce point à l'axe vertical de symétrie donne l'épaisseur du contrefort. Les arcs en ogive ont besoin d'une épaisseur de contrefort moindre que les arcs en demi-cercle ou surbaissés, comme le montre la Figure 57D.

Santiago Huerta présente une formule et conclut que l'épaisseur du

contrefort d'un arc en demi-cercle (h/portée= ½) est égale à 1/3 x la portée. Si la hauteur du contrefort est de 1/5 x portée (h/portée = 1/5) contrefort/portée= 1/27. Il y a une limite pour les arcs surbaissés de ½ x portée. Huerta remarque que, finalement, Rodrigo Gil a réussi à définir la règle, qui est en accord avec les règles de la Renaissance pour les arcs et les voûtes en berceau: le contrefort doit mesurer au moins le 1/3 de la portée.

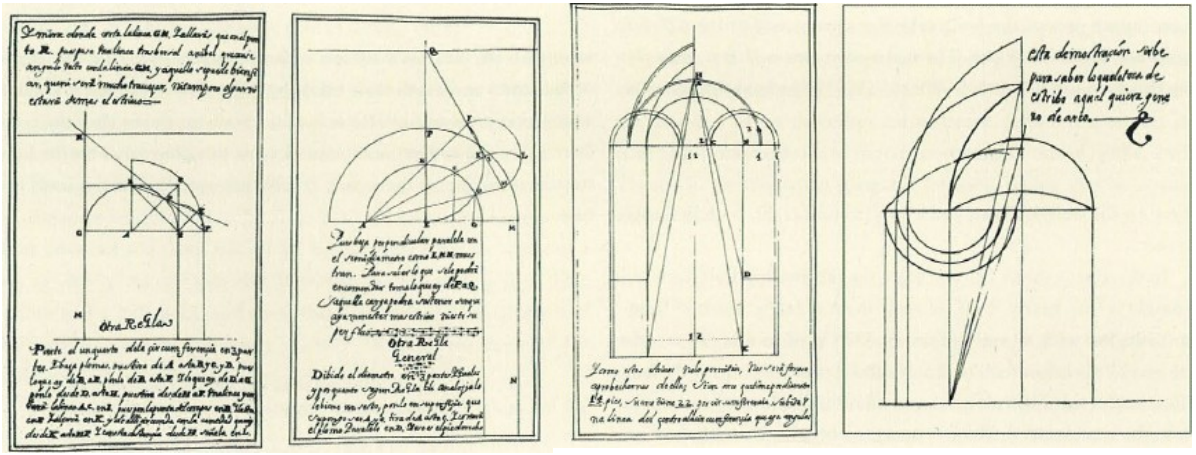


Figure 57. Dessins de Rodrigo Gil de Hontañón.
Recherche des méthodes pour tracer l'épaisseur du contrefort pour les formes Renaissance (Huerta Fernández, 2012).

2.3 Portugal – Typologie des voûtes

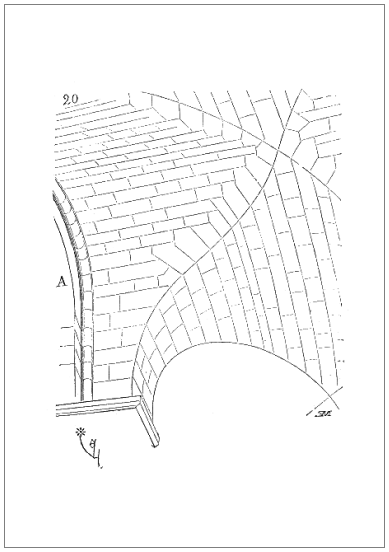
2.3.1 *Considérations terminologiques*

Ogives

La croisée d'ogives est la plus simple des voûtes à nervures. L'ogive se définit comme étant la diagonale qui relie la clef centrale aux appuis. Comme l'indiquait Viollet le Duc, la voûte en croisée d'ogives fait suite à la voûte d'arêtes, qui est l'intersection de deux voûtes en berceau. Le croisement à angle droit de deux berceaux en plein cintre produit en effet un arc elliptique irrégulier qui est difficile à réaliser (Figure 58). Les anciens bâtisseurs ont pallié cette difficulté en remplaçant ces arcs irréguliers par des arcs diagonaux, les ogives, pour voûter l'intersection des berceaux, pour renforcer la structure de la voûte et surtout pour faciliter la construction. [274]

Pour des raisons constructives, les bâtisseurs ont introduit des changements formels. Les ogives, qui au départ avaient une forme elliptique ont évolué vers une forme d'arc en plein cintre, qui est plus simple à construire, et les berceaux ont pris une forme brisée.

La croisée d'ogives n'était plus cette forme qui résulte du croisement de deux berceaux, mais elle devient une forme autonome.



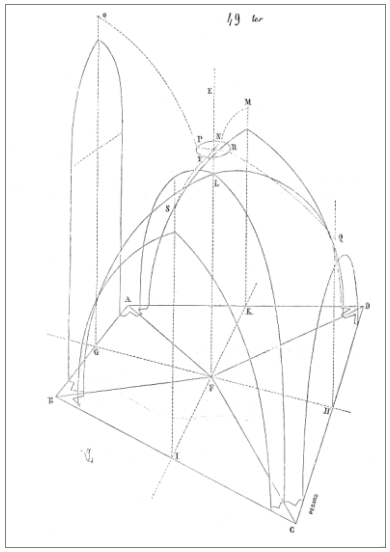


Figure 58. Croisement à angle droit de deux berceaux en plein cintre produit une ellipse. (Viollet Le Duc, 1854-58)

Figure 59. La nervure est l'arc générateur de la forme.
Le système constructif de la croisée d'ogives permet de créer plusieurs formes de voûte et de couvrir des espaces irréguliers (Viollet Le Duc, 1854-58).

La nervure devient l'ossature de la voûte. C'est la nervure qui crée la forme.

Ce système permet de créer plusieurs formes de voûte et de couvrir des espaces irréguliers, en contrebutant simplement les nervures en

[274] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9 – Voûte, Librairie, Imprimeries réunis, Paris,1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle.

arc de cercle, à l'exemple donné par Viollet-le-Duc (Figure 59). [275]

Liernes

De la même manière que les ogives cachent les arêtes à l'intersection des voûtains, des liernes disposés sur la ligne faîtière des berceaux brisés cachent l'intersection des 2 voûtains. Pour Viollet le Duc, les lignes faîtières sont la conséquence naturelle de la rencontre des voussoirs disposés parallèlement aux murs, dont elles servent à couvrir les joints. L'emplacement et la forme des nervures obéissent à des raisons constructives[276].

Choisy adhère à cette idée de Viollet-le-Duc, mais certains auteurs refusent d'attribuer une fonction de couvre-joint aux lignes faîtières. Marcel Aubert remarque que les premières lignes faîtières datent du 12ème siècle (voûtes bombées de la nef d'Airaines et abside de Lucheux, Somme) et comme les voûtes angevines, les voussoirs ne sont pas disposés parallèlement aux murs : « Les liernes montant des clefs des doubleaux et des formerets à la clef des croisées agissent un jeu comme des étais et renforcent l'ossature de la voûte ».[277]

Nous n'aborderons pas ici la problématique de la fonction structurelle des nervures. De notre point de vue, la nervure joue un rôle à la fois architectural, constructif et structurel.

En France, on appelle *lierne* la nervure qui se trouve sur la ligne de faîte de la voûte. Elle relie la clef centrale et les clefs de l'arc doubleau et des formerets. Les nervures qui ne sont pas au sommet et qui relient les clefs intermédiaires sont qualifiées de *secondaires*[278] ou *contre-liernes*[279].

Par contre, en Angleterre, ces nervures *secondaires* sont appelées « liernes » et on retrouve souvent la désignation de *lierne vault*.

Willis explique qu'il utilise cette désignation pour faire la distinction avec les nervures qui sont situées au sommet de la voûte : la *ridge line*. Le mot *lierne* a été utilisé par De l'Orme pour désigner les petites nervures qui ne descendent pas jusqu'aux appuis. Le mot, que De l'Orme applique à la menuiserie, dans son ouvrage *Inventions pour bien bâtir*, désigne les petits éléments qui relient les arches en bois de la charpente à plusieurs niveaux *« les*

[275] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* Librairie, Imprimeries réunis, Paris,1854-1858, vol IV, p. 7.
[276] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9 – Voûte, Librairie, Imprimeries réunis, Paris,1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle.

[277] AUBERT, M., Les plus anciennes croisées d'ogives. Leur rôle dans la construction, A. Picard, Paris, 1934.
[278] PÉROUSE De MONTCLOS Jean Marie, *Architecture : Vocabulaire*, Imprimerie Nationale, Paris, 1989, p. 280.
[279] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9 – Voûte, Librairie, Imprimeries réunis, Paris, 1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle

Liernes qui lient et tiennent en raison les dictz aiz pour faire les hémicycles », ou comme le dit Willis *connecting pieces*. Willis rappelle que ce mot vient du français et il l'utilise sans aucune objection. De même, il utilise également les mots *formerets*, et *tiercerons*. [280]

Tiercerons

Après avoir introduit l'ogive et la nervure faîtière, les bâtisseurs créèrent le tierceron, qui est une nervure qui part de l'appui et qui finit sur une clef secondaire placé sur la ligne de faîte. Ces nervures sont disposées entre les nervures principales afin de réduire leur écartement et de permettre de remplir les voûtains sans recourir à un cintrage intermédiaire, ce qui représente une simplification de la construction et une économie de moyens.

Viollet le Duc remarque que la pose des voussoirs n'est pas la même en Angleterre et en France, ce qui se traduit par des agencements de voûte tout à fait différents de ceux admis par l'école française (Figure 60)[281]

La typologie des voûtes diffère selon les pays. Par conséquent, la terminologie utilisée pour définir les types de nervures et les types de voûtes présente parfois quelques divergences d'un pays à l'autre.

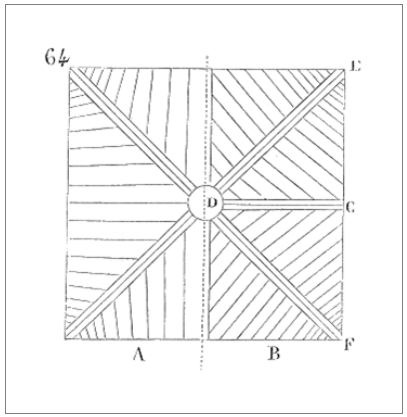


Figure 60. Disposition des voussoirs en France (gauche) et en Angleterre (droite).
(Viollet Le Duc, 1854-58)

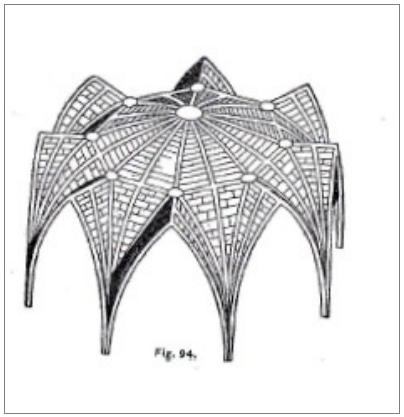


Figure 61. Chapitre de la cathédrale de York. *Voûte à liernes*.
(Babcock, 1895)

La disposition des voussoirs des voûtains parallèlement aux murs (à la française) souligne la ligne faîtière et préserve la forme traditionnelle de la voûte sur croisée d'ogives. Par contre, lorsque les voussoirs sont disposés concentriquement autour de la clef centrale (à l'anglaise), ils permettent de créer des figures géométriques centrales, formées par des liernes au sommet de la voûte - des carrés, des losanges, des pentagones, des hexagones, des octogones. Ce type de voûte est courant en Angleterre et c'est pour cette raison peut-être

[280] WILLIS, Robert, *On the construction of the vaults of the middle ages*, Royal Institute of British Architects of London, 1842.pp. 31-32.
[281] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9 – Voûte, Librairie, Imprimeries réunis, Paris,1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle

qu'on a éprouvé le besoin de donner un nom différent à ces nervures et de le classer comme voûte à liernes. (Figure 61)

On retrouve également ce genre de voûte au Portugal, qui fut notamment utilisée par João de Castilho. Les figures formées par des liernes peuvent créer des sommets courbes ou plats (des plafonds, le mot est de Montclos) et servent souvent à lier les travées. Pour cette raison, nous différencions ce type de nervures et ce type de voûte, comme en Angleterre, en les appelant voûtes à liernes. Comme exemples, voir la voûte du passage à la sacristie d'Alcobaça (Figure 77), avec un plafond au centre, et la voûte du chœur de Santa Cruz de Coimbra, avec des losanges entre les travées (Figure 72, annexe PT-Co3).

Combados

Pour relier les clefs secondaires comme le font les liernes, le Manuélin a également utilisé un autre type de nervure qui est courbe en plan. Ce nouveau type de nervure introduite au Portugal par Castilho est caractéristique de la voûte manuéline, comme nous le disions au chapitre 1 à propos du chœur de la cathédrale de Braga. Elle fut importée d'Espagne, où elle s'appelle *combado* [282] comme au Portugal[283]. Nous n'avons pas trouvé d'autre terme pour ce type de nervure. En Angleterre on ne l'utilise pas. En Allemagne, dans les *bogenrippengewölbe*, les nervures courbes sont disposées différemment dans la voûte : parfois au sommet, comme au Portugal et en Espagne, mais souvent elles partent des appuis, à la place des tiercerons. Il ne faut pas confondre *combado* et tiercerons courbes en plan. Des exemples sont la voûte à combados de la sacristie de Jerónimos, et la voûte à tiercerons courbes en plan, de la chapelle de Nossa Senhora do Pópulo (Figure 70), la seule voûte de ce genre au Portugal.

Les *combados* que nous avons trouvés au Portugal sont des nervures courbes en plan mais pas en élévation. Ils relient des clefs situées à une hauteur identique (ou quasi identique) en créant des *plafonds* au sommet de la voûte, comme les liernes, et en introduisant un mouvement continu à travers toute la voûte en abrogeant la division en travées.

Dans le cadre de la présente étude, étant donné la grande ressemblance entre les voûtes portugaises et les voûtes anglaises et espagnoles, nous utiliserons les mots soit *lierne faîtière* soit *lierne* pour différencier les nervures disposées sur l'axe de la voûte et celles qui relient les clefs secondaires. Le terme *combado* est ici employé pour désigner une nervure courbe en plan disposée au sommet de la voûte et qui relie les clefs, comme en Espagne. Nous verrons que la forme de la voûte change parfois en présence de ces éléments secondaires, qui deviennent alors très importants.

[282] PALACIOS GONZALO, José Carlos, "Geometric Tools in Juan De Alava's Stonecutting, Workshop", in *Nexus Network Journal* 11, Kim Williams Books, Turin , 2009, pp. 331–340.
[283] ATANÁZIO, M. C. Mendes, *A Arte do Manuelino, Mecenas, Influências, Espaços*, Editorial Presença, Lisboa, 1984. p. 120.

Nervures composées

À la fin du gothique, les voûtes se complexifient et adoptent des réseaux de nervures qui permettent de créer des surfaces ininterrompues. Rappelons que le mot *réseau* vient du latin qui signifie *filet.* Ces voûtes sont appelées de voûtes en réseau, réticulées ou en résille, ce qui n'identifie pas le type de nervures, mais plutôt la forme, un maillage intense de nervures. De la même manière que pour l'étoile, nous utilisons ce mot pour identifier la forme du plan.

Comme pour les voûtes précédentes, nous avons cherché à classer ce genre de voûte par type de nervures. Ce travail a été long et complexe. Dans le cas des voûtes portugaises, des réseaux voûtés sont moins complexes qu'ailleurs en Europe. Les voûtes en réseaux manuélines sont habituellement formées par des croisées de nervures parallèles et perpendiculaires entre elles. C'est ce qu'on appelait à l'époque la *croisée à la romaine*, comme nous l'avons déduit à partir d'un document relatif aux voûtes du couvent du Christ à Tomar, que nous avons présenté dans le chapitre historique. C'est avec des voûtes de ce type que Castilho a créé des formes en berceau, forme qu'il a empruntée à la Renaissance.

Nous retrouvons ce genre de voûtes en Angleterre et en Allemagne[284].

[284] BÜRGER, Stefan, *Figurierte Gewölbe zwichen Saale und Neisse: Spätgotische Wölbkunst von 1400 bis 1600*, 3 Teilbände, Weimar: VDG Weimar Auflage: vol. 1, 2007, pp. 89-101.

Nous les classons comme *voûte à nervures composées* - ogives, tiercerons et liernes – en considérant la nervure comme un élément composé de plusieurs segments, comme un arc à plusieurs centres.

Prenons comme exemple la voûte de l'église Mouliherne (Figure 62A, B et C), en France, qui a été reprise dans le dictionnaire de Viollet le Duc pour expliquer le rehaussement de la voûte[285] et ensuite par Montclos pour expliquer les éléments des *voûtes à nervures multiples*[286].

Pour Viollet Le Duc, les arcs AC et BD sont des ogives, et EG et GF sont des ogives secondaires.

Pour Montclos, AC et BD sont composés de trois types de nervures : une branche d'ogive (AR), un tierceron (CK) et un lierne (RK). L'ogive principale est ainsi un élément composé de plusieurs segments séparés par des clefs.

Les deux définitions sont complémentaires. Nous considérerons, comme Viollet Le Duc, que les arcs AC et BD sont des ogives principales, et EF et DF des ogives secondaires. Et comme Montclos, nous considérons la composition de plusieurs segments de nervures. Nous considérons l'ogive principale une nervure composée.

[285] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle,* vol. 9 – Voûte, Librairie, Imprimeries réunis, Paris,1854-1858.
http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l'architecture_française_du_XIe_au_XVIe_siècle

[286] PÉROUSE de MONCLOS, J.M., *Principes d'analyse scientifique. Architecture. Vocabulaire,* Imprimerie Nationale, 1988, p. 311.

Nous qualifions ce type de voûte de *à nervures composées*. Le cas de Moulhierne serait une voûte à nervures composées, à croisé d'ogives. En plan, on voit une voûte à plusieurs travées, mais il s'agit en réalité d'une seule et unique voûte.

Comme l'observe Viollet Le Duc, ce système permet de surhausser la hauteur de la clef centrale et de construire des voûtes de plus large portée.

Cette typologie de nervure et de voûte prend des formes croisées, parallèles ou réticulées, quand la quantité de nervures s'interceptant est plus dense.

2.3.2 *Classement des voûtes par type*

Les données concernant les voûtes des édifices que nous avons visités sont présentées sous forme d'un tableau. Dans le texte, les voûtes sont présentées par catégories et le tableau est simplifié pour être mieux lisibles.

Les premières colonnes reprennent l'identification de l'édifice et de la voûte (le numéro ID est celui de l'annexe), la localisation (arrondissement et ville), le type de bâtiment (église, monastère, couvent), désignation du bâtiment, l'espace qui couvre la voûte (nef, transept, chœur, chapelle, narthex, porche), l'architecte à qui on attribue normalement la voûte.

Le deuxième groupe de colonnes reprend les données du plan de la voûte. On y trouve le nombre de clefs et le classement des nervures

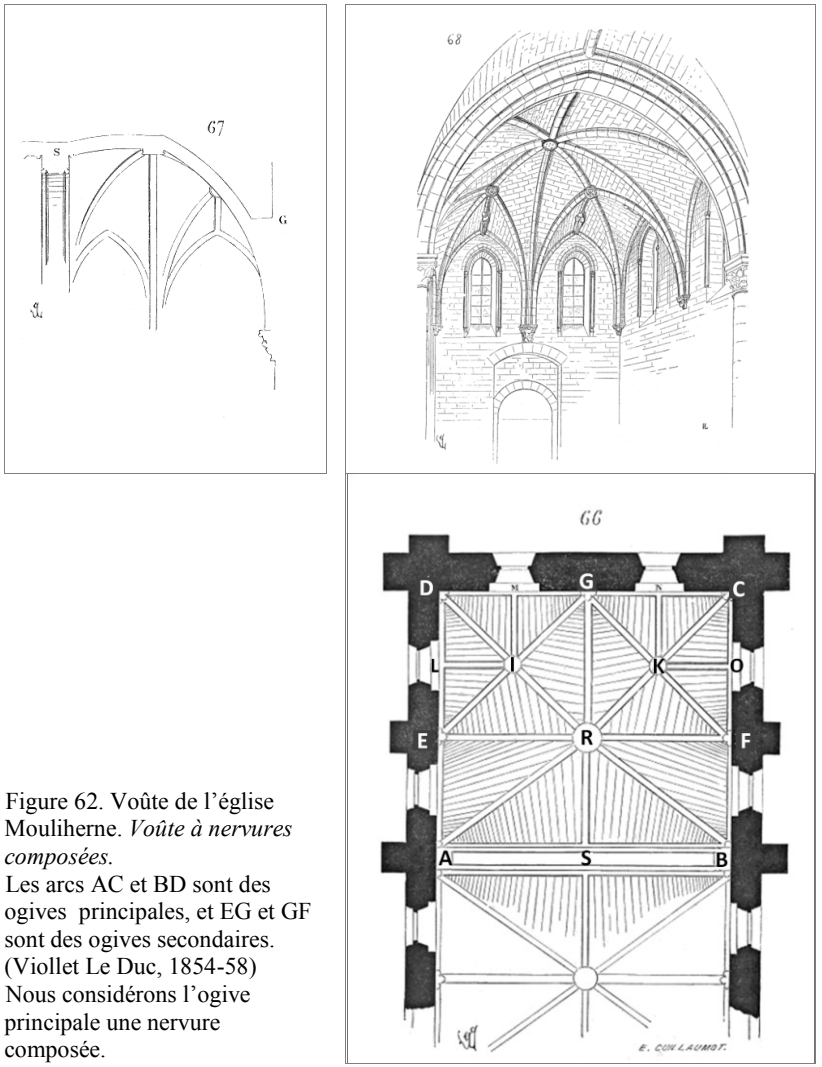


Figure 62. Voûte de l'église Mouliherne. *Voûte à nervures composées.*
Les arcs AC et BD sont des ogives principales, et EG et GF sont des ogives secondaires. (Viollet Le Duc, 1854-58)
Nous considérons l'ogive principale une nervure composée.

par ordre hiérarchique - des nervures principales aux secondaires - les ogives (O), les tiercerons (Ti), les liernes (Li) et les *combados* (Co). Les nervures principales sont celles qui partent des appuis – ogives et tiercerons – et les nervures secondaires sont celles qui relient les clefs. Dans la colonne correspondant à chaque type de nervure, nous identifions la forme que la nervure définit en plan. Le type de nervure composée (Cp) est inclus dans la colonne de chaque nervure correspondant : les nervures composées peuvent être des ogives, des tiercerons ou des liernes.

Les deux colonnes suivantes reprennent les données sur les lignes faîtières longitudinales (FL) et transversales (FT). S'il existe des liernes faîtières dans le sens longitudinal, nous indiquons la lettre (L). Si les liernes faîtières couvrent tout l'axe de la voûte, nous indiquons (L*).

Les trois colonnes suivants, indiquent la forme en élévation des nervures principales : les ogives (O), les transversales (T) et les longitudinales (L). La forme des nervures est classée comme suit : arc de cercle (C), arc brisé (B) et anse de panier (A).

Les deux colonnes suivants incluent la forme en élévation des lignes faîtières longitudinales (FL) et transversales (FT). La voûte est caractérisée en élévation par la forme de ses lignes faîtières : horizontale (H), courbe (R : *redondo*, en espagnol), brisé (B) ou mixte (M : horizontale et ronde).

La colonne (type) figurant à droite de ce groupe indique le classement final de la voûte. On garde toujours la catégorie la plus complexe. Par exemple, si la voûte a des liernes, nous considérons qu'il s'agit d'une voûte à liernes mais cela ne signifie pas que la voûte est dépourvue d'ogives ou de tiercerons. Il faut consulter le tableau si on veut d'autres renseignements sur la voûte. Normalement, une voûte à tiercerons aura des ogives, et une voûte à liernes et à *combados* aura des tiercerons - normalement en forme d'étoile à quatre branches (E4).

La colonne « forme » indique la forme de ces nervures en plan.

Dans l'ensemble des 213 voûtes portugaises que nous avons analysées, 57 sont des voûtes d'ogives, 53 sont des voûtes à tiercerons, 37 sont à liernes, 36 sont des voûtes à *combados*, 28 sont des voûtes à nervures composées.

2.3.2.1 Voûtes d'ogives

La voûte d'ogives (O) : les ogives sont des nervures principales qui partent des appuis et qui se rejoignent à la clef centrale ; les ogives peuvent se présenter sous forme de diagonales - croisée d'ogives (C), cas des voûtes sur plan carrées ou rectangulaires - ou radiales (R), ou des voûtes sur plan radial, cas des voûtes d'absides. On ajoute à cette information le nombre de branches ou d'appuis[287].

[287] PÉROUSE de MONCLOS, J.M., *Principes d'analyse scientifique. Architecture. Vocabulaire,* Imprimerie Nationale, 1988, p. 280. Montclos fait la distinction entre ogive et branche d'ogive. Nous incorporons les deux dans le même type de voûte, considérant que leur fonction structurelle est la même.

Formes en plan (Figure 63):

C4 : croisée d'ogives à quatre branches/appuis (voûte quadripartite);

C6 : croisée d'ogives à six branches/appuis (voûte sexpartite);

C8 : croisée d'ogives à huit branches/appuis (voûte octopartite);

R6 : ogives radiales à six branches ; le nombre de branches/appuis dépend du nombre de côtés. Typologie courante des voûtes de chœur sur plan polygonal ;

R8 : ogives radiales à huit branches.

Résultats du tableau

Les voûtes d'ogives analysées sur plan carré ou rectangulaire ont toutes une forme de croisée d'ogives sur quatre appuis (C4). Nous avons trouvé un seul cas de voûte d'ogives sur huit appuis (C8), au couvent São Francisco de Beja (annexe PT-Be2.3).

Sur sept voûtes de chœur, six ont une forme radiale d'ogives à six branches (R6) et une seule possède une forme radiale à 8 branches (R8). Ces voûtes sont plus anciennes et datent des 14ème et 15ème siècles.

La forme des voûtes d'ogives varie en fonction de la forme en élévation des nervures et des lignes faîtières.

Les lignes faîtières sont pour la plupart horizontales dans les deux axes, longitudinalement et transversalement (37 voûtes). 11 des

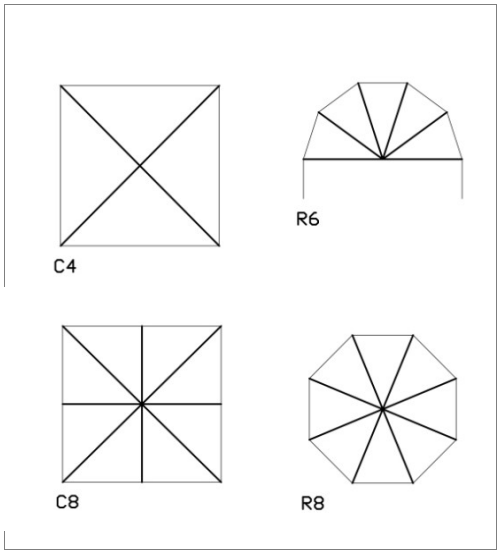


Figure 63. Voûtes d'ogives.



Figure 64. Voûtes d'ogives, église Santa Maria do Olival, Tomar



Figure 65. Voûtes d'ogives, couvent du Crist à Tomar

voûtes présentent un faîte horizontal longitudinalement et courbe transversalement. Seules 9 des voûtes sont courbes sur les deux axes.

25 voûtes présentent une ligne faîtière accentuée par des liernes dans le sens longitudinal, et dans le sens transversal pour 10 voûtes.

Couramment, la plupart des voûtes d'ogives présentent une ogive en arc de cercle, avec des nervures transversales et longitudinales brisées. Dans un groupe de voûtes plus anciennes les nervures sont toutes en arc brisé.

Les voûtes en croisée manuélines sont surbaissées, avec des nervures en anse de panier. Ces types se localisent en Alentejo, dans les voûtes du narthex de la matrice d'Alvito (annexe PT-Be1.7), au cloître du couvent de Lóios (annexe PT-Ev13.8) et au couvent de São Bento de Cástris (annexe PT-Ev8.1), et dans trois voûtes du monastère de Crato (annexe PT-Pg3).

Castilho utilise ce type de voûtes d'ogives surbaissées au couvent du Christ à Tomar (annexe PT-Sa6). Au cloître de Santa Barbara, les ogives sont pratiquement horizontales et la voûte est plate.

2.3.2.2 Voûtes à tiercerons

La voûte à tiercerons (Ti) : les tiercerons sont des nervures qui partent d'un pilier ou d'une console, comme l'ogive, mais qui n'aboutissent pas à la clef centrale. Le tierceron aboutit sur la ligne faîtière longitudinale ou transversale de la voûte, sur des clefs secondaires.

Formes en plan (Figure 66):

4 : quatre tiercerons naissant d'un pilier ou d'une console jusqu'aux clefs secondaires de la voûte. Elles sont normalement reliées entre elles par des liernes faîtières.

E4 : voûtes en étoile à quatre branches : deux tiercerons naissent de chaque appui jusqu'aux lignes faîtière.

E4+ : comme E4, avec plus de tiercerons.

E8 : voûtes en étoiles à huit Branches, sur plan octogonal.

Résultats du tableau

Des cinquante-quatre voûtes à tiercerons, la plupart (36) sont en étoile à quatre branches (E4)

Nous trouvons le seul exemple d'étoile à six branches (E6) à la chapelle de la tour de Belém (annexe PT-Lx1.4). Il y a quatre exemples d'étoiles à huit branches (E8). De ce dernier type, deux voûtes sont au monastère de Batalha (Santa Maria da Vitória, annexe PT-Le4.29 et 30) – le chapitre et la chapelle du Fundador –, à la chapelle Senhor dos Inocentes à Evora (annexe PT-Ev5.2) et dans le chœur du monastère de Celas à Coimbra (annexe PT-Co2.3).

Sept des voûtes sont du type plus simple (Ti_4), avec un seul tierceron partant de chaque appui. Les exemples de ce type sont tous concentrés à Evora, et dans la nef de l'église de Nossa Senhora do Pópulo (annexe PT-Le2.5). Ce groupe reprend les voûtes des églises de Pavia (annexe PT –Ev16.5) et du couvent de Lóios (annexe PT – Ev2.2), celles de la nef de l'église de São Francisco de Évora (annexe PT-Ev11.3) et du porche du couvent de São Bento de Castris (annexe PT-Ev8.4).

La voûte du chœur de l'église Nossa Senhora do Pópulo est le seul exemple que nous avons trouvé de voûtes à tiercerons courbes en plan (Cu), comme en Allemagne et Europe Centrale. Le plan des nervures est en forme d'étoile à huit branches radiales sur plan octogonal.

Certaines voûtes sont dépourvues d'ogives : la voûte de l'église de Nossa Senhora do Pópulo, la chapelle de la tour de Belém, la chapelle de Fundador du monastère de Batalha, la voûte de la nef de São Francisco d'Évora, la voûte du cloître du couvent de Jésus à Sétubal et du cloître du *Silence* au monastère de Santa Cruz de Coimbra.

Souvent, la voûte conserve la forme qui est déterminée par les ogives, par exemple, les chapelles de São Francisco à Evora (annexe PT-Ev11.6), la matrice de Barcelos (annexe PT –Br2.6) et de São Miguel à Santa Cruz (annexe PT-Co3). La plupart prennent la forme découlant des tiercerons, par exemple, les voûtes de la chapelle de Fundador et du chapitre à Batalha (annexe PT-Le4.29 et 30) et la voûte du chœur de Mértola (annexe PT-Be8.4).

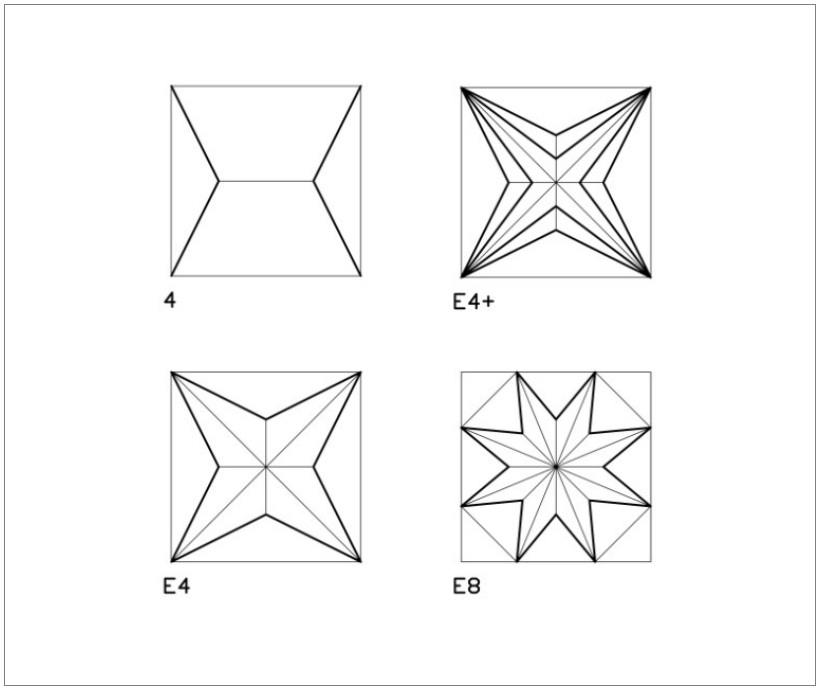


Figure 66. Voûtes à tiercerons.

Lorsque les lignes faîtières de ces voûtes sont longitudinalement horizontales, elles unifient les travées et la voûte prend une forme en berceau brisé, exemple des nefs de São Francisco et du couvent de Lóios à Evora, de la nef de Nossa Senhora do Pópulo, du cloître



Figure 67. Église Nossa Senhora do Pópulo (Ti_4)



Figure 68. Église-matrice de Mértola, chœur (Ti_E4)



Figure 69. Monastère de Batalha, chapelle do Fundador (Ti_E8)



Figure 70. Église Nossa Senhora do Pópulo, chœur (Ti_Cu)

supérieur de Jeronimos et du réfectoire du couvent Flor da Rosa. Ces exemples présentent des formes de nervures diverses, en plan et élévation, mais avec une voûte de forme continue unissant les travées.

Parmi les voûtes à tiercerons en étoile attribuées à Castilho**,** nous distinguons deux types. Le premier type reprend les voûtes dont les diagonales sont en arcs de cercle alors que les autres nervures sont brisées : à Lisbonne, celle de l'étage supérieur du cloître de Jerónimos (annexe PT-Lx3.46), la voûte du porche de la cathédrale de Braga (annexe PT-Br3.10), les chapelles de l'église de Marvila (annexe PT-Sa3.9 et 12), les voûtes des chapelle de la nef de Vilar de Frades (annexe PT-Br1.7) et de Vila do Conde (annexe PT-Px4.14), la voûte de la nef de Moncorvo (annexe PT-Bg4.5). Le deuxième groupe reprend des voûtes surbaissées, dont tous les arcs sont en anse de panier : voûte du cloître du couvent de Sétubal (annexe PT-Se3.13); couvent du Christ de Tomar (annexe PT-Sa6.11 et 19), voûtes du narthex et couloirs des noviciats ; et narthex de l'église d'Arronches (annexe PT-Pg2.15).

2.3.2.3 Voûtes à liernes

Voûte constituée de liernes (Li), nervures qui relient les clefs de voûte entre elles et qui ne partent pas des appuis. La forme des liernes en plan peut être radiale (R) par rapport aux clefs, en étoile (E) mais, souvent, les liernes créent des figures (F) centrales au sommet de la voûte - carrés, pentagones, hexagones, octogones, etc. On exclut ici les liernes faîtières, qui ne produisent aucune forme particulière en plan et puisqu'elles marquent juste les axes des voûtes. Ces données sont tirées de la colonne (Li).

Formes en plan (Figure 71):

R2 : liernes radiales à deux branches.

E2 : liernes en étoile à deux branches.

E4 : liernes en étoile à quatre branches.

E4// : liernes en étoile parallèle au plan

F4 : liernes formant une figure à quatre côtés (carré ou losange).

F6 : liernes formant une figure hexagonale.

F8 : liernes formant une figure octogonale.

Résultats du tableau

Parmi les 37 voûtes à liernes analysées, nous trouvons une grande variété de formes en plan des nervures.

Trois voûtes à liernes ont une pointe en forme d'étoile (E1). Deux de ces voûtes datent du début 1500 (chœurs des églises de Moura et de l'église matrice de Golegã), plus une des voûtes des chapelles imparfaites du monastère de Batalha. Ces voûtes présentent des ogives en arc de cercle alors que les autres nervures sont brisées.

Cinq voûtes à liernes ont une pointe en forme d'étoile (E1). Deux de ces voûtes datent du début 1500 (chœurs des églises de Moura - annexe PT-Be9.3 - et de l'église matrice de Golegã - annexe PT- Sa2) plus des voûtes des chapelles imparfaites du monastère de Batalha (annexe PT-Le4.19, 21 et 23). Ces voûtes présentent des ogives en

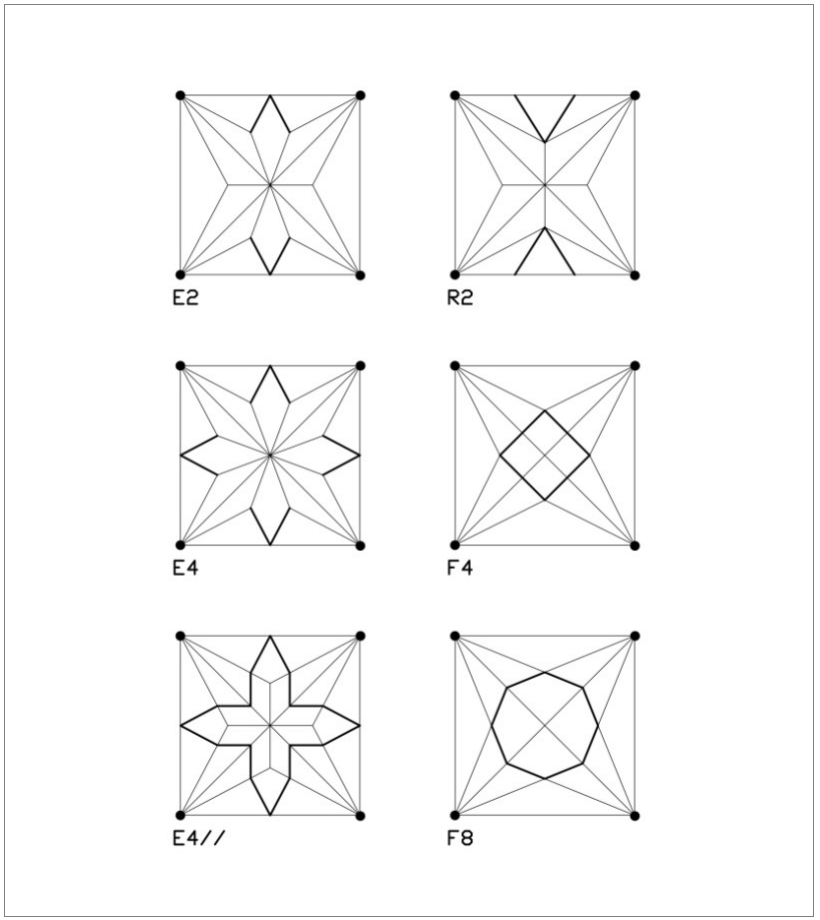


Figure 71. Voûtes à liernes

arc de cercle alors que les autres nervures sont brisées.

Cinq voûtes forment deux pointes en étoiles (E2) : couvent de Santa Cruz de Coimbra (annexe PT-Co3) - nef et chapelle de São Teotónio – chœur de la chapelle de Santo Cristo à Belém, (annexe PT-Lx4) au chœur de São Francisco d'Evora (annexe PT-Ev11) et à la nef de l'église matrice de Vimieiro (annexe PT-Ev3).

Cinq voûtes sont en étoile de 4 branches (E4) : à Belém, la voûte du réfectoire du monastère et la voûte de la nef de la chapelle de São Jerónimo (annexe PT-Lx2), à Évora, au couvent de Lóios (annexe PT-Ev13) et à la cathédrale (annexe PT-Ev14), dans la nef de l'église de Misericordia d'Arronches (annexe PT-Pg1) et dans le narthex du couvent de Santa Cruz de Coimbra (annexe PT-Co3).

Il existe trois voûte en étoile à quatre branches parallèles (E4//) à la sacristie de l'église São Domingos d'Elvas (annexe PT-Pg4), au chœur de l'église de Góis et au chœur de l'église de Atalaia (annexe PT-Sa9).

Nous trouvons un exemple de liernes radiaux (R1) dans le chœur de l'église d'Azurara (annexe PT-Px3), et autres deux exemples (R2) dans la voûte du chœur de Santa Cruz de Coimbra (annexe PT-Co3) et dans la nef du couvent de Lóios à Arraiolos (annexe PT-Ev2).

Nous trouvons sept exemples de liernes formant des figures centrales à quatre côtés (F4) : quatre sont en forme de losanges, au monastère de Vilar de Frades (annexe PT-Br1) – nef, chœur et croisée – et au couvent de São Domingos de Évora (annexe PT-Ev10); trois sont en forme de carré, aux voûtes de l'église de Torre



Figure 72. Monastère Santa Cruz, Coimbra, chœur (Li_E2)



Figure 73. Église de Misericórdia d'Arronches, chapelle (Li_E4)



Figure 74. Église d'Atalaia (Li_E4//)



Figure 75. Couvent São Domingos, Évora (Li_F4)



Figure 76. Monastère de Jerónimos, Lisbonne, cloître inférieur (Li_F4)



Figure 77. Monastère d'Alcobaça, passage vers la sacristie (Li_F6)

de Moncorvo (annexe PT-Bg4) et à la chapelle nord de la matrice d'Arronches (annexe PT-Pg2).

Il n'existe qu'un seul exemple de voûte à liernes en hexagone central (F6) : celui de la voûte du passage à vers la sacristie du monastère d'Alcobaça (annexe PT-Le1), de Castilho.

Six voûtes ont une forme d'octogone central (F8), desquelles trois sont à Jerónimos (annexe PT-Lx3): les voûtes des deux chapelles du transept et celle du cloître inférieur. Nous en trouvons aussi au monastère de Crato (annexe PT-Pg3), dans le narthex de la cathédrale d'Évora (annexe PT-Ev14) et dans l'église matrice de Viana do Castelo. Les trois premières sont de Castilho et les autres lui sont contemporaines.

Les liernes formant des figures au sommet de la voûte prennent une forme particulière et relient les travées entre elles.

Ces sommets peuvent être plats, comme un plafond. On en connaît deux exemples de Castilho : la voûte d'accès à la sacristie du monastère d'Alcobaça (annexe PT-Le1) et celle du vestibule de Batalha (annexe PT-Le4). Trois autres exemples sont situés au sud du pays, dans la nef du couvent de Lóios (annexe PT-Ev13) et du couvent de São Domingos à Evora (annexe PT- Ev10) et à la chapelle de la matrice d'Arronches (annexe PT-Pg2).

Quand les deux lignes faîtières sont courbes, le sommet délimité par les liernes devient arrondi et parfois prend une forme en coupole. C'est le cas des voûtes à liernes en octogone du cloître inférieur et des chapelles du transept de Jerónimos (annexe PT-Lx3), et de la voûte de l'église matrice de Viana do Castelo (annexe PT-VC3). Cette forme de coupole sur octogone se retrouve aussi dans la nef de Jerónimos (annexe PT-Lx3).

Des formes arrondies au sommet se retrouvent aussi aux voûtes en étoile à quatre branches (E4), celles du réfectoire de Jerónimos (annexe PT-Lx3), de l'église de Misericordia de Arronches (annexe PT-Pg1), la chapelle de São Jerónimo à Belém (annexe PT-Lx2), et de la croisée de Vilar de Frades (annexe PT-Br1).

La voûte de la nef de Moncorvo (annexe PT-Bg4) est courbe sur trois nefs, comme celle de Freixo-de-Espada à Cinta (annexe PT-Bg1) et d'Arronches (annexe PT-Pg2).

On trouve un grand nombre de voûtes à liernes attribuées à João de Castilho (13). La voûte documentée d'Alcobaça (F6 - annexe PT-Le1); des voûtes à figure centrale (F4) – trois à Vilar de Frades (annexe PT-Br1) et deux à Torre de Moncorvo (annexe PT-Bg4) - et quatre voûtes (F8) à Jeronimos (annexe PT-Lx3); des voûtes en forme d'étoile à quatre branches (E4) – le réfectoire de Jeronimos et la voûte à plusieurs étoiles (E+) sur le vestibule de Batalha (annexe PT-Le4)

2.3.2.4 Voûtes à *combados*

Voûte constituée de *combados* (Co), nervures secondaires (comme les liernes) mais courbe en plan.

Disposées au sommet de la voûte, il ne faut pas les confondre avec

les tiercerons courbes (Cu), qu'on retrouve dans certaines voûtes en Europe centrale.

Formes en plan (Figure 78):

c : Les *combados* sont disposés en circonférence. Normalement, la circonférence est centrée sur la clef centrale. Si on trouve plusieurs circonférence, le nombre est alors indiqué (C2, C3, etc.) ;

F4 : Le plus souvent, les *combados* sont à quatre côtés. Dans les autres cas, le nombre de côtés est indiqué (F5, F6, etc.).

Qa : Quadrilobe à *combados* concaves par rapport à la clef centrale.

Qb : Quadrilobe à *combados* concaves et convexes par rapport à la clef centrale (en accolade).

Qd : Quadrilobe à *combados* convexes par rapport à la clef centrale. Les combados sont concaves autour des appuis.

Résultats du tableau

On trouve 36 voûtes à *combados* parmi les exemples analysés. Elles se localisent surtout au nord, à la frontière avec l'Espagne, dans la région de Cantabrie d'où sont originaires les *Biscayens* venus travailler au Portugal. Il s'agit des églises matrices de Caminha (annexe PT-VC1), de Ponte de Lima (annexe PT-VC2), de Vila do Conde (annexe PT-Px4) et d'Azurara (annexe PT-Px3), les monastères de Vilar de Frades (annexe PT-Br1), à Barcelos, et de Guimarães, la cathédrale de Braga (annexe PT-Br3) et à Porto, la

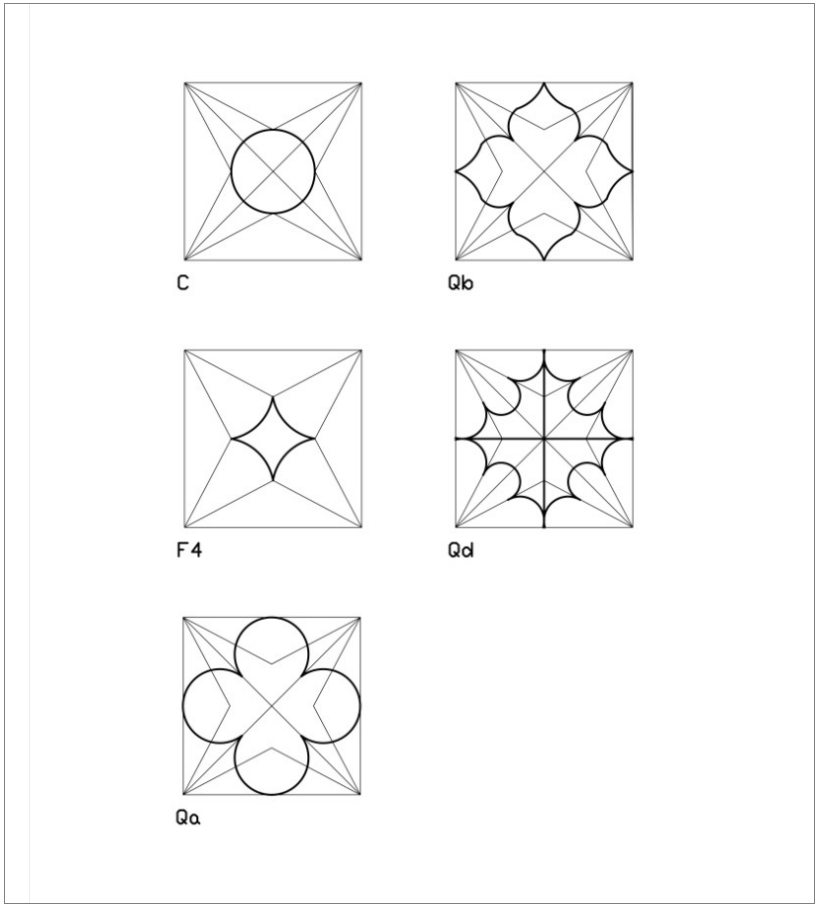


Figure 78. Voûtes à *combados*.



Figure 79. Couvent São Francisco, chapelle
(Co_c, Qb)



Figure 80. Église de Marvila, chœur
(Co_Qd)

cathédrale et le couvent São Francisco (annexe PT-Px1). On en retrouve aussi à l'intérieur du pays, à Freixo de Espada-à-Cinta (annexe PT-Bg1) et à la cathédrale de Viseu (annexe PT-Vi1). Dans la région centre et plus au sud, au monastère de Santa Cruz, à Coimbra (annexe PT-Co3), à l'église du couvent du Christ de Tomar (annexe PT-Sa6), à l'église de Marvila à Santarém (annexe PT-Sa3), à la cathédrale de Portalegre (annexe PT-Pg6), dans les églises d'Arronches (annexe PT-Pg2) et du couvent de São Francisco à Montemor-o-Novo (annexe PT-Ev15), l'église du couvent de Jésus à Setúbal (annexe PT-Se3) et le couvent de Lóios à Évora (annexe PT-Ev13). À Lisbonne, au monastère de Jerónimos. (Annexe PT-Lx3)

Dix-sept voûtes présentent des *combados* circulaires (c) au centre de la voûte. Les cercles peuvent être isolés, dans le narthex de la cathédrale de Viseu (annexe PT-Vi1), l'absidiole droite de la matrice de Caminha (annexe PT-VC1), les voûtes des chapelles de Ponte de Lima (annexe PT-VC2), Vila do Conde (annexe PT-Px4), Vilar de Frades (annexe PT-Br1) et du couvent de Lóios (annexe PT-Ev13).

Pour deux voûtes, nous trouvons des *combados* formant des figures à quatre côtés (F4) : à la croisée de la cathédrale de Porto (annexe PT-Px2) et dans la chapelle du chœur de Freixo de Espada-à-Cinta (annexe PT-Bg1).

Le quadrilobe est une forme courante dans les voûtes à *combados*.

Il existe quatre exemples de quadrilobes concaves (Qa) : au nord, dans la chapelle gauche du couvent São Francisco (annexe PT-Px1), à Guimarães et dans la nef de l'église São João das Donas (annexe PT-Co3), à Coimbra ; au sud, les voûtes de la sacristie du couvent de São Francisco d'Evora (annexe PT-Ev11) et du chœur du couvent des Lóios à Arraiolos (annexe PT-Ev2).

Cinq voûtes présentent des quadrilobes en accolade (Qb) : celles de Jerónimos (sacristie et narthex), le chœur de Freixo de Espada-à-Cinta (annexe PT-Bg1), le narthex de Santa Cruz de Coimbra (annexe PT-Co3) et l'église du couvent du Christ à Tomar (annexe PT-Sa6).

Il existe cinq voûtes dont les *combados* sont convexes par rapport à la clef centrale (Qd) : celles des chœurs de l'église de Misericórdia, à Freixo-de-Espada-a-Cinta (annexe PT-Bg1), l'église matrice de Vila do Conde, Marvila (annexe PT-Sa3), le chapitre du couvent de Lóios d'Evora (annexe PT-Ev13) et le narthex de la cathédrale de Viseu (annexe PT-Vi1).

On distingue plusieurs types distincts de combinaisons de *combados*, qui sont décrits plus en détail sur le tableau. Par exemple, les cercles peuvent être accompagnés d'étoiles (chapelle de Santo Cristo à Belém, annexe PT-Lx4), ou de quadrilobes en accolade (chapelle droite du transept de Vila do Conde, annexe PT-Px4, chapelle São Francisco à Porto, annexe PT-Px1, chapelle et chœur de l'église matrice de Caminha, (annexe PT-VC1), de carrés (chapelle de Vilar de Frades, (annexe PT-Br1) ou de quadrilobe de types différents.

On trouve 21 voûtes à *combados* attribuées à João de Castilho. Cinq de ces voûtes possèdent des *combados* sur plan circulaire, et affectent une forme de coupole sommitale : la voûte du chœur de Braga (annexe PT-Br3), la chapelle droite de l'église de Vila do Conde (annexe PT-Px4), les deux voûtes du transept de Vilar de Frades (annexe PT-Br1) et la voûte surbaissée du narthex de la cathédrale de Viseu (annexe PT-Vi1). À Vila do Conde la voûte de la chapelle gauche est éclairée par une lanterne centrale. Quatorze voûtes sont constituées de *combados* quadrilobés, cinq concaves (Qa), quatre convexes (Qd) ou cinq en accolade (Qb).

La plupart de ces voûtes ont leurs deux lignes faîtières courbes, sauf celles de l'église de Misericordia de Freixo de Espada-à-Cinta (annexe PT-Bg1) et de la chapelle Santo Cristo à Lisbonne (annexe PT-Lx4). Les voûtes des chœurs de Setúbal et de Vila do Conde (annexe PT-Px4) présentent une courbe unique sur les deux travées. Environ la moitié de ses voûtes sont surbaissées et présentent des ogives en anse de panier, alors que les autres nervures sont en arc de cercle ou en arc brisé. Seul le narthex de la cathédrale de Viseu (annexe PT-Vi1) présente des nervures qui sont toutes en anse de panier.

2.3.2.5 Voûtes à nervures composées

Voûte constituée de nervures composées (Cp), qui sont des nervures à segments multiples.

Les nervures composées peuvent être de plusieurs types. Au Portugal, elles se présentent surtout sous forme de croisée. Nous incluons aussi dans ce groupe les voûtes à caissons, constituée de nervures parallèles entre elles en forme de *caisson.* Leurs formes en plan sont les suivantes (Figure 81):

(O-Li) 4C : à 4 croisée d'ogives et liernes

(O-Ti) 2C : à 2 croisées d'ogives et tiercerons

(O-Ti) 4C : à 4 croisées d'ogives et tiercerons

(Ti) 2C : à 2 croisées de tiercerons

(O) 4C : à 4 croisées d'ogives

(O) 6C : à 6 croisées d'ogives

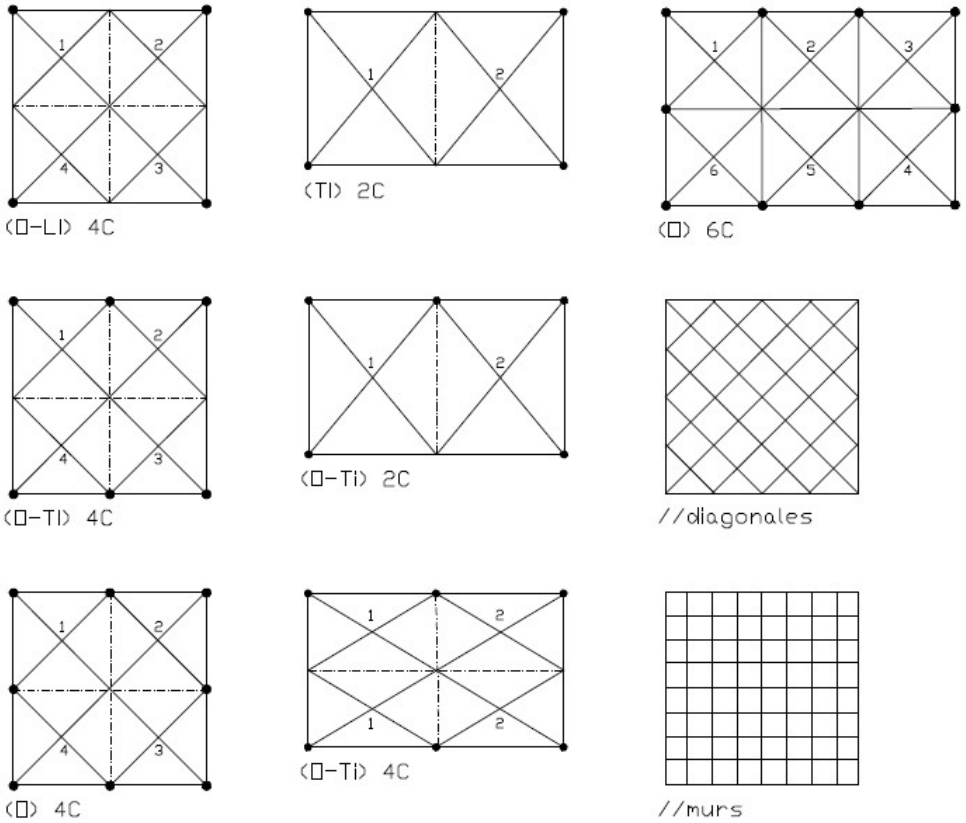


Figure 81. Voûtes à nervures composées

Quand les voûtes sont constituées de plusieurs types de nervures différents, on ajoute l'astérisque *. Par exemple, le transept de Jerónimos, qui est constitué de 6 croisée d'ogives et de nervures d'autres types est noté (O-*) 6C.

(L-T) Ca//murs : voûte à caisson, de nervures longitudinales et transversales disposées parallèlement aux murs.

Résultats du tableau

Le type de voûte à nervures composées, en particulier avec des nervures croisées, est très représentatif de l'architecture de João de Castilho. Nous avons trouvé au Portugal 26 voûtes de ce type, desquelles 14 sont attribuées à Castilho, la plupart au couvent du Christ de Tomar.

Ce système structurel provient du gothique classique français de voûtes sur croisées d'ogives. C'est ainsi que nous le retrouvons au monastère de Batalha (annexe PT-Le4), construit par Huguet entre 1402-1436. On trouve deux voûtes de ce type : la voûte du chœur et la voûte d'une des chapelles imparfaites, qui constituent probablement les premiers exemples du genre au Portugal.

La voûte du chœur du monastère de Batalha (annexe PT-Le4) est constituée d'ogives et de tiercerons composés sur deux travées. Le plan forme quatre croisées, et en élévation, les ogives sont en forme de demi-cercle, et les doubleaux et les formerets sont des arcs brisés. La voûte de la chapelle est constituée de deux croisées de tiercerons composés. Ces deux voûtes de Batalha sont formées par des arcs de cercle avec des formerets et des doubleaux brisés.

Ces voûtes sont principalement concentrées dans les régions des villes de Leiria et de Beja. Nous en retrouvons des exemples au monastère de Batalha (annexe PT-Le4), au monastère et à l'église de Santa Maria do Olival à Tomar (annexe PT-Sa6), à l'église Santa Maria de Sintra (annexe PT-Lx6) et au monastère de Jerónimos à Lisbonne (annexe PT-Lx3); et dans la région de l'Alentejo, aux couvents de Crato (annexe PT-Pg3), Arraiolos (annexe PT-Ev13) et São Francisco à Beja (annexe PT-Be2). Il en existe un seul exemple au nord du pays, à l'église de Miranda do Douro.

La plupart des voûtes (20) sont surbaissées, avec des nervures en anse de panier. Quatre voûtes sont constituées de nervures qui, y compris les formerets et les doubleaux, sont toutes en arc de cercle.

Ce type de structure permet de construire une seule voûte sur plusieurs travées et de créer des surfaces continues et des formes courbes en berceau.

(O-Li) 4C: Les voûtes les plus simples sont constituées de liernes composés. Le plan montre 4 croisées d'ogives et de liernes sur 1a travée. Nous en trouvons deux exemples au couvent de Crato (annexe PT-Pg3), et à l'église de Misericórdia de Beja (annexe PT-Be3), de forme surbaissée. Trois voûtes de ce type, plus tardives, sont de forme cupulaire, caractéristique de la Renaissance, des voûtes de Miguel Arruda (églises de Miranda do Douro, annexe PT-Bg3 et Luz de Tavira, (annexe PT-Fa1) et de Baltasar Alvares

(cathédrale de Leiria, Figure 82).

Castilho utilise cette typologie à la librairie de Tomar, Figure 83), sur plusieurs travées, avec la ligne faîtière horizontale, ce qui produit une voûte unique en forme de berceau.

(O-Ti) 2C et 4C - Nous trouvons des voûtes composées sur 2 travées à Tomar, à 2 croisée d'ogives et de tiercerons, au cloître principal , Figure 88), et à 4 croisées, dans l'escalier d'accès entre le cloître principal et le cloître Santa Bárbara (annexe PT-Sa6).

La voûte de la chapelle imparfaite du monastère de Batalha (annexe PT-Le4), de Huguet, est similaire en plan mais pas quant à sa forme. À Batalha, les tiercerons sont des segments de cercle, tandis qu'à Tomar, les segments qui se trouvent au sommet sont plats.

(Ti) 2C - Le type de voûte à nervures composées, à 2 croisées de tiercerons par travée, est la plus fréquente au couvent de Christ de Tomar. Ce système est utilisé dans les quatre cloîtres du couvent, et leur forme est déterminée par des lignes faîtières horizontales, qui produisent un plafond plat au sommet et un berceau continu entre les travées. Cette typologie a également été utilisée par Castilho à l'église de Santa Maria do Olival (Figure 84, annexe PT-Sa5), et peut-être aussi (non confirmé) à l'église Santa Maria de Sintra (annexe PT-Lx6).

(Ti-*) 2C - Ces voûtes sont similaires aux précédentes, avec d'autres nervures en plus des tiercerons composés. La voûte du porche de la cathédrale d'Evora (annexe PT-Ev14) présente en outre des tiercerons en étoile. Au monastère de Jerónimos (Figure 85), annexe PT-Lx3), deux des voûtes du narthex sont similaires à celle d'Evora, avec en plus des liernes en étoile. Les voûtes de Jerónimos ont une forme plus régulière, du fait de leurs lignes faîtières bien arrondies et décrites par un seul arc de cercle.

Ce système de croisée d'ogives composées sur deux travées, lorsqu'il est appliqué sur plusieurs travées, produit une voûte en



Figure 82. Cathédrale de Leiria. Cp_(O-Li) 4C.



Figure 83. Couvent du Christ, Tomar Bibliothèque. Cp_(O-Li) 4C.



Figure 84. Église Nossa Senhora do Olival, Tomar. Cp_(Ti) 2C.



Figure 85. Monastère de Jerónimos, Lisbonne, Narthex. Cp_(Ti*) 2C.

berceau, cas des deux voûtes du porche et du cloître du couvent de Lóios à Arraiolos (annexe PT-Ev2). La différence entre ces deux voûtes et celle du chœur de Batalha se situe au niveau de l'élévation des arcs, qui sont surbaissés à Arroiolos.

(O) 4C - Les voûtes à nervures composées en croisée d'ogives sont structurellement les plus importantes : s'agissant d'ogives, il est possible de voûter de grandes portées, comme on le voit avec la voûte du passage du chapitre du couvent de Tomar, appliqué sur un plan de 2x2 travées (Figure 86 annexe PT-Sa6). Castilho conçoit ainsi la voûte du transept de Jerónimos, mais sur un plan beaucoup plus large (2x3 travées). À Jeronimos, les ogives principales traversent deux travées et se croisent entre elles. En tout, le plan est composé de six croisées d'ogives (annexe PT-Lx3).

Castilho montre son goût pour cette typologie de voûte à nervures composées dans certains éléments architecturaux tels que les angles du cloître au monastère de Jerónimos (Figure 87, annexe PT-Lx3), et les portails latéraux et principaux du même monastère (Figure 89 et Figure 91). La voûte du portail sud peut être comparée à une des voûtes latérales du cloître principal du couvent de Tomar.

Dans notre inventaire, nous trouvons trois exemples de voûtes à caisson: la voûte du chœur de la matrice de Ponte de Lima (annexe PT-VC2), et au couvent du Christ de Tomar (annexe PT-Sa6), les voûtes des couloirs des noviciats et la voûte du réfectoire, de João de Castilho (Figure 90).



Figure 86. Couvent du Christ, Tomar, chapitre. Cp_(O) 4C



Figure 87. Monastère de Jerónimos, Lisbonne, cloître



Figure 88. Couvent du Christ, Tomar, cloître principal. Cp_(O-Ti) 2C



Figure 89. Monastère de Jerónimos, Lisbonne, portail sud



Figure 90. Couvent du Christ, Tomar, réfectoire. Cp_//murs.



Figure 91. Monastère de Jerónimos, Lisbonne, portail sud

2.3.3 *Les églises-halles*

Les églises-halles manuélines associées à João de Castilho sont celles de Freixo de Espada-à-Cinta, d'Arronches et de Belém (Jerónimos). Au premier chapitre, nous avons proposé d'y rajouter trois autres églises qui présentaient des voûtes similaires sur lesquelles João de Castillo aura pu intervenir : les églises-halles du couvent de Jésus de Setúbal, la cathédrale de Viseu et l'église de Torre de Moncorvo (Figure 92). Comme nous l'avons vu, on ne dispose pas de documentation concernant ces voûtes, excepté pour Jerónimos.

Pour expliquer l'origine de la forme en berceau des églises-halles (de Castilho ou non), et sa présence au Portugal, nous avons élargi notre étude à d'autres églises du 16ème siècle. Outre l'observation visuelle que nous effectuons sur les autres édifices que nous abordons, nous avons aussi réalisés pour ces églises des relevés architecturaux de manière à pouvoir les comparer de manière plus précise.

Les églises-halles castilliennes

En plan, toutes ces voûtes sont du à croisée d'ogives (O_C4) sauf la voûte de la nef de Moncorvo (annexe PT-Bg4), qui est une voûte à liernes (Li_F4), et la voûte de la nef de Jerónimos (annexe PT-Lx3), qui est une voûte à liernes composées et à *combados*.

En élévation, elles ont une similarité : la hauteur des clefs centrales correspond à la longueur de la demi-diagonale en plan de la travée, tracé traditionnel de la voûte en croisée d'ogive (Figure 93 - Figure 98).

L'église de Jésus de Setúbal est composée d'une croisée d'ogives dans la nef centrale et de demi-voûtes en berceau dans les nefs latérales. La forme particulière des voûtes latérales semble constituer une première tentative d'unifier l'espace à l'aide d'une voûte en berceau. Dans le sens longitudinal, les lignes faîtières horizontales unifient les travées. La demi-voûte de la dernière travée de la nef est à la même hauteur que la voûte du chœur.

Dans la cathédrale de Viseu, la section transversale est une ligne faîtière courbe brisée qui traverse les trois nefs (à l'instar de Freixo, Arronches et Jerónimos). La forme est peu lisible à cause de l'épaisseur des colonnes et des nervures longitudinales qui limitent la visibilité dans le sens transversal. La continuité longitudinale et transversale qu'on trouve entre les travées est accentuée par une ligne faîtière figurant une corde à nœuds qui parcourt l'axe des voûtes. On retrouve cette même continuité dans le transept.

L'église de Freixo de Espada-à-Cinta est identique à celle de Viseu en plan. De même, la continuité longitudinale est accentuée par des nervures faîtières qui longent les nefs ; de même, la courbe de la ligne faîtière transversale est accentuée par des liernes faîtiers qui vont de mur à mur. La forme courbe est mieux finie et la lisibilité transversale est plus claire grâce aux sections plus fines des nervures et des colonnes.

L'église d'Arronches est dépourvue de nervures longitudinales entre les colonnes, ce qui favorise la fusion des nefs et la lisibilité dans le sens transversal. Des liernes accentuent la ligne faîtière courbe de la voûte, sans arriver aux murs mais en s'arrêtant aux clefs des nefs latérales, ce qui renforce d'autant la lisibilité diagonale de l'espace.

L'église de Torre de Moncorvo est quasiment absente de l'historiographie portugaise. Pourtant elle possède une voûte qui présente cette même forme de ligne faîtière courbe traversant les trois nefs. La continuité est accentuée par des liernes dans les axes transversal et longitudinal. Les voûtes de la nef centrale sont à liernes formant des carrés centraux, tandis que les voûtes des nefs latérales sont à tiercerons.

La voûte à *combados* de l'église du monastère de Jerónimos ne présente aucune nervure transversale ou longitudinale qui sépare les travées. Elle n'a pas non plus de diagonales directes entre les appuis. Toutes les nervures traditionnelles ont été remplacées par des paires de triangles accolés entre eux formés de tiercerons et de liernes. Les liernes droits et les *combados* en plan forment des figures géométriques (octogones, carrés, losanges) qui constituent la surface courbe de la voûte. La forme courbe n'est plus seulement une ligne – le lierne transversal - mais elle s'étend à toute la surface de la voûte en berceau, engendré par un réseau de nervures secondaires.

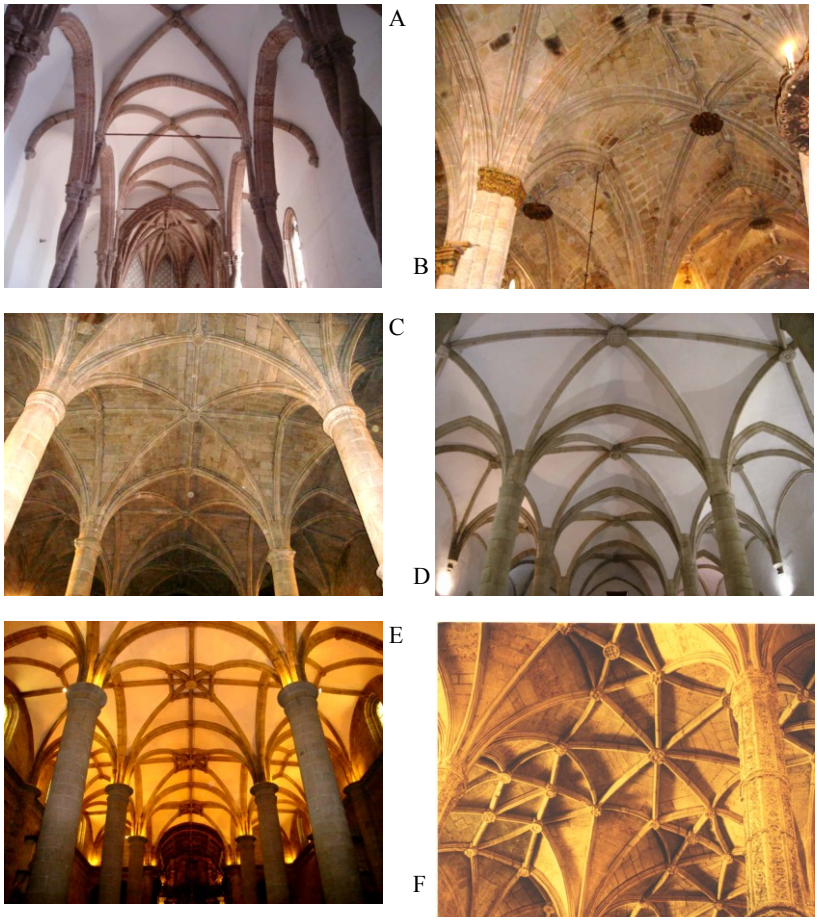


Figure 92. Églises-halles castilliennes
Église de Jésus de Setúbal (A), cathédrale de Viseu (B), églises de Freixo de Espada-à-Cinta (C), Arronches (D), Torre de Moncorvo (E) et monastère de Jerónimos (F).

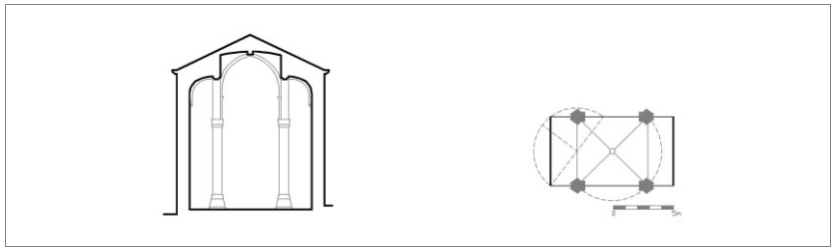


Figure 93. Église du couvent de Jesus de Setúbal

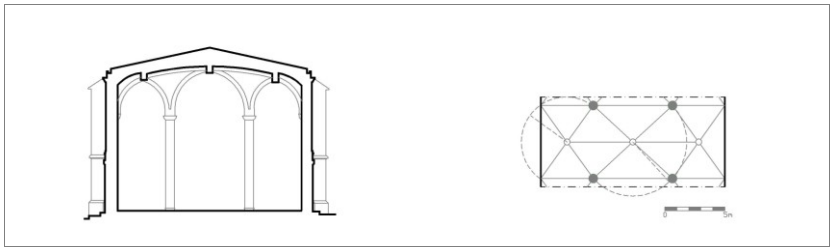


Figure 94. Église d'Arronches

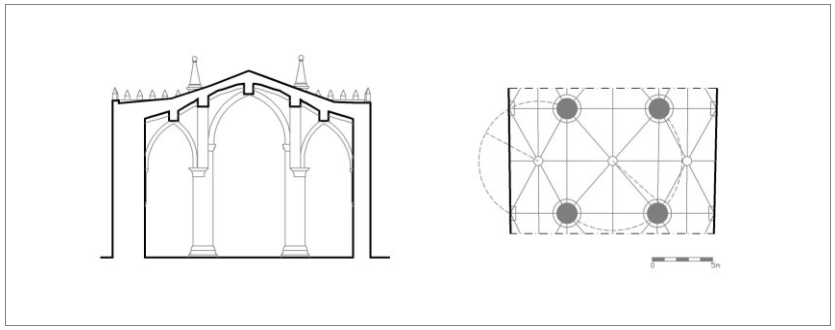


Figure 95. Cathédrale de Viseu

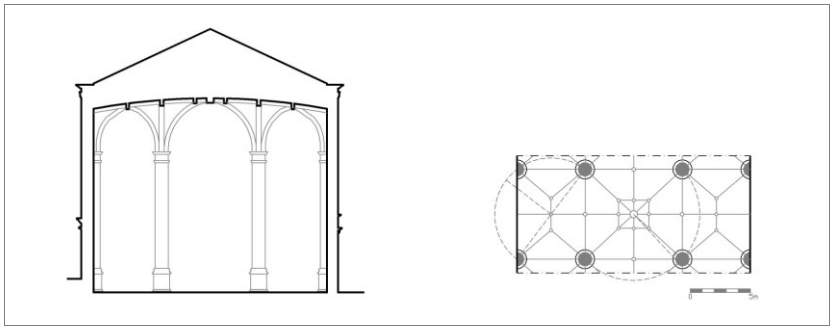


Figure 96. Église de Torre de Moncorvo

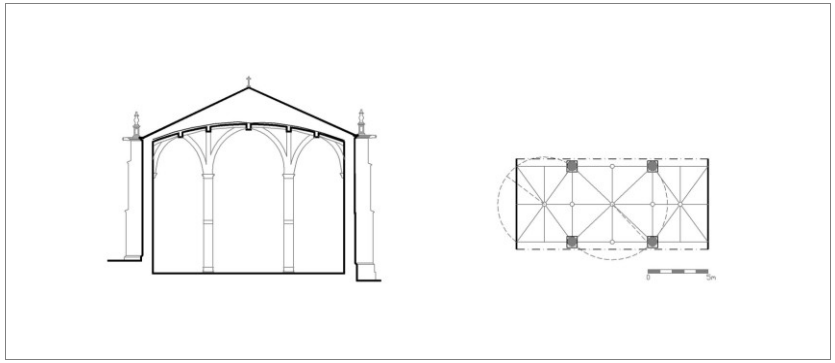


Figure 97. Église de Freixo de Espada-a-Cinta

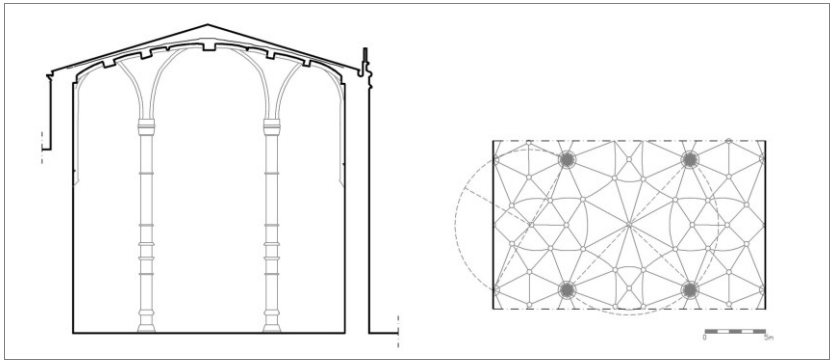


Figure 98. Église du monastère de Jerónimos

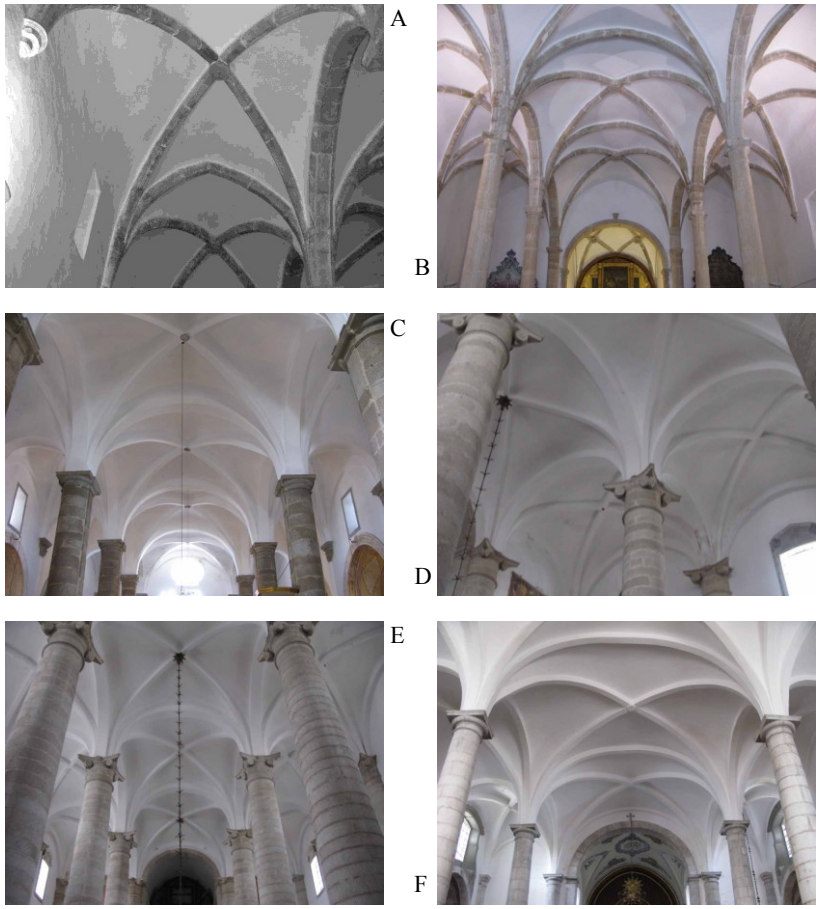


Figure 99. Églises de Luz à Tavira (A, B) et de Santo Antão à Évora (D, E), Alcáçovas (C) et Santa Maria da Feira à Beja (F).

Autres églises-halles du 16ème siècle

Les autres églises-halles sont toutes recouvertes par des voûtes sur croisée d'ogives (O_C4).

a) Deux églises possèdent une forme de voûte qui se rapproche de la voûte en berceau (Figure 99 A, B, D, E).

L'église paroissiale de Luz de Tavira, seule église-halle d'Algarve, date du milieu du 16ème siècle. Ses travées sont recouvertes de voûtes sur croisée d'ogives qui présentent des lignes faîtières longitudinales horizontales et des lignes transversales courbes. Les nefs latérales sont dépourvues de formerets et la voûte en berceau naît dans le prolongement du mur.

L'église Santo Antão d'Évora a été projetée par Miguel de Arruda en 1548 et ensuite construite entre 1557 et 1563. Ses voûtes sont sur croisée d'ogives avec des arcs diagonaux ovales et des arcs doubleaux en plein cintre. Les lignes faîtières longitudinales sont courbes et la ligne faîtière transversale s'apparente fortement à une ligne faîtière courbe traversant les trois nefs, mais sa courbe n'est pas aussi continue et sa forme n'est accentuée par aucun lierne transversal.

b) Il existe deux églises-halles dont les formerets sont plus bas que les arcs longitudinaux et dont la ligne faîtière courbe s'abaisse près des murs : l'église-matrice d'Alcáçovas (qui était en chantier en 1534) et l'église Santa Maria da Feira dont l'intérieur date du dernier quart du 16ème siècle et qui présente des arcs pleins et ovales sur les diagonales (Figure 99C, F).

c) Nous distinguons aussi un groupe d'églises-halles plus manuélines (Figure 100) dont les arcs en ogives ou les lignes faîtières, horizontales ou courbes, ont un rayon égal à la longueur de la diagonale (courbure peu marquée). L'église-matrice de Mértola (une mosquée du 12ème siècle reconvertie en église), à cinq nefs, dont les voûtes présentent une ligne faîtière courbe transversalement, et horizontale longitudinalement. L'église-matrice de Veiros, érigée entre 1559 et 1595, probablement par Miguel de Arruda, possède des arcs ogivaux et des lignes faîtières courbes. La cathédrale de Portalegre, érigée entre 1556 et 1571 et attribuée à Afonso Álvares, possède des voûtes à *combados*, surbaissées suivant ses diagonales ovales et à deux ligne faîtières horizontales. L'église-matrice de Pavia possède une nef centrale surbaissée par sa diagonale ovale et à lignes faîtières courbes. L'église de Misericórdia de Beja a une ligne faîtière horizontale construite à l'origine au deuxième tiers du 16ème siècle et des lignes faîtières courbes dans la travée rajoutée en 1550 recevant le chœur actuel.

d) Les autres églises-halles sont plus de style Renaissance, avec des arcs pleins et des lignes faîtières courbes et parfois avec une courbure identique à celle de la diagonale, formant des coupoles mais où l'aspect d'unification des travées a été complètement délaissé (Figure 101) :

- l'église de Fora du monastère d'Alcobaça, datant de 1548 et attribuée à Miguel de Arruda ;

-la cathédrale Sé de Beja, érigée en 1590 par Jorge Rodrigues, dont les lignes faîtières sont encore horizontales ;

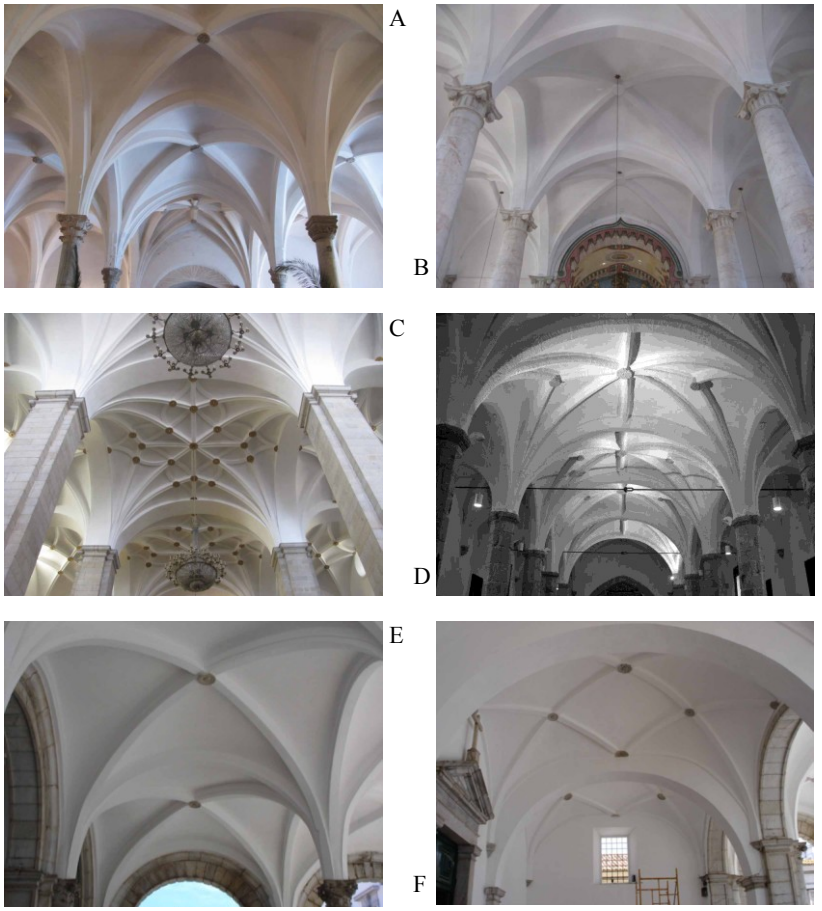


Figure 100. Églises-halles manuélines.
Églises de Mértola (A) Veiros (B), cathédrale de Portalegre (C), Pavia (D), Misericórdia à Beja (E,F).

- l'église Santa Maria d'Estremoz, datant de 1560 et attribuée à Miguel de Arruda, sur plan carré et à travées rectangulaires formées de tiercerons sur un lierne central, à lignes faîtières peu marquées ;

- l'église de Misericordia, de Santarém, attribuée à Miguel de Arruda et achevée en 1602, dont les voûtes sont en forme de coupole ;

- la cathédrale Sé de Leiria, achevée en 1571 sur un projet d'Afonso Alvares, dont les voûtes sont également cupulaires, et ;

- l'église de Miranda do Douro, érigée à partir de 1554 par Pedro de la Faia et Miguel de Arruda.

On remarque que, bien que ces églises présentent des formes Renaissance, la technique de leur construction est toujours basée sur le système gothique de la croisée d'ogives.

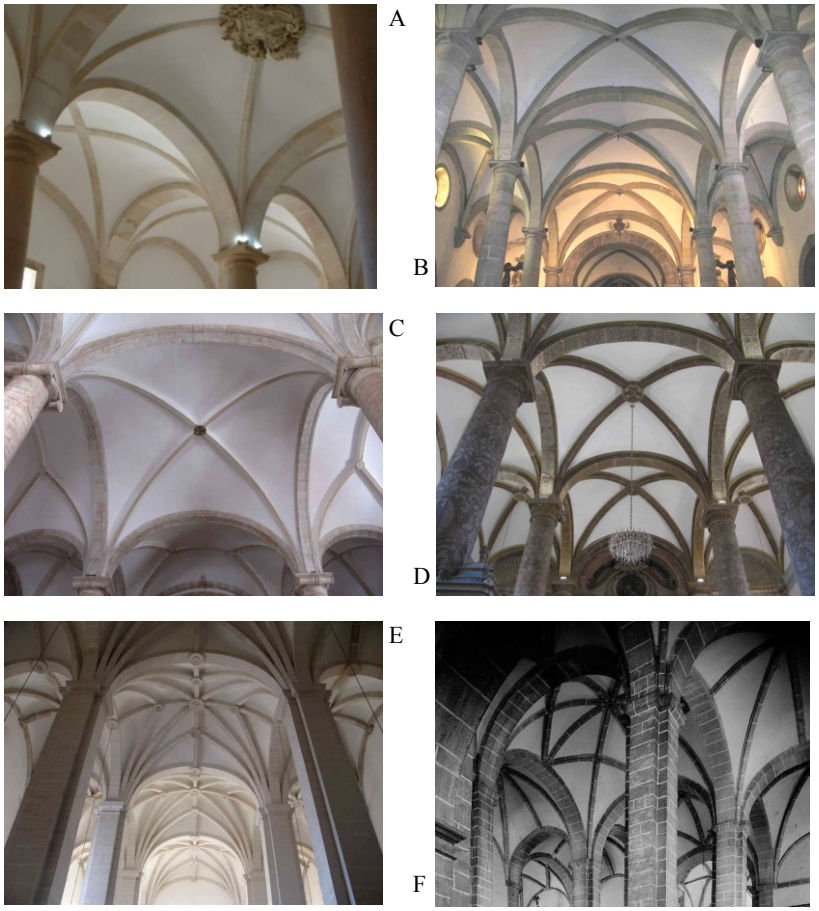


Figure 101. Églises-halles Renaissance.
Église de Fora du monastère d'Alcobaça (A), cathédrale de Beja (B), églises Santa Maria à Estremoz (C), Misericórdia à Santarém (D), cathédrale de Leiria (E) et église de Miranda do Douro (photo IHRU) (F).

2.3.4 *Tableau de classification et plans de localisation des voûtes analysées*

Tableau 1 - Tableau de classification des voûtes - Portugal

ID	Arrondissement	Ville	Type	Désignation	Voûte	Architectes	Clefs (1 travée)	O	Ti	Li	Co	FL	FT	O	T	L	FL	FT	Typologie	Forme
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Accès sacristie	?	1	C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	B	O	C4
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cloître Sta. Barbara	JC	1	C4	-	-	-	-	-	A	A	A	H	H	O	C4
Ev14	Évora	Sé e São Pedro	CATHÉDRAL	ÉVORA	Cloître	?	1	C4	-	-	-	L*	-	C	B	B	H	H	O	C4
Pg3	Crato	Flor da Rosa	MONASTÈRE	FLOR DA ROSA	Nef	?	1	C4	-	-	-	-	-	A	A	A	H	H	O	C4
Pg3	Crato	Flor da Rosa	MONASTÈRE	FLOR DA ROSA	Salle-Réfectoire	?	1	C4	-	-	-	-	-	A	A	A	H	H	O	C4
Pg3	Crato	Flor da Rosa	MONASTÈRE	FLOR DA ROSA	Salle	?	1	C4	-	-	-	-	-	A	A	A	H	H	O	C4
Gu1	Guarda	Guarda	CATHÉDRAL	GUARDA	Nef (3)	?	1	C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	H	O	C4
Ev13	Évora	Sé e São Pedro	COUVENT	LÓIOS	Cloître inférieur	?	1	C4	-	-	-	-	-	A	A	A	H	H	O	C4
Ev13	Évora	Sé e São Pedro	COUVENT	LÓIOS	Clître supérieur	?	1	C4	-	-	-	-	-	C	C	B	H	H	O	C4
Be7	Cuba	Vila Ruiva	ÉGLISE	M. DE VILA RUIVA - N.SRA. DA ENCARNAÇÃO	Chapelle -	TF?	1	C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	H	O	C4
Be1	Alvito	Alvito	ÉGLISE	M. DO ALVITO - N. Sra. da Assunção	Narthex (3)	JA	1+1	C4	-	-	-	-	-	A	A	A	H	H	O	C4
Be6	Beja	Sta. Maria da Feira	MONASTÈRE	N. SRA DA CONCEIÇÃO (museu)	Cloître	JA inspeccionou	1	C4	-	-	-	-	-	C+B	B	B	H	H	O	C4
Ev8	Évora	Malagueira	COUVENT (Chapître)	SÃO BENTO DE CÁSTRIS	Cloître	EL	1	C4	-	-	-	-	-	A	A	-	H	H	O	C4
Co1	Coimbra	Sé Nova	ÉGLISE	SÃO SALVADOR	Chapelle droite	?	1	C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	H	O	C4
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Cloître	AD	1	C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	H	O	C4
Le1	Alcobaça	Alcobaça	MONASTÈRE	STA. MARIA DE ALCOBAÇA	Nef (3)	?	1	C4	-	-	-	-	-	B	B	B	H	H	O	C4
Ev15	Montemor-o-Novo	N. Sra da Vila	COUVENT	SÃO FRANCISCO	Nef	?	1	C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	R	O	C4
Lx7	Sintra	São Pedro de Penaferrim	COUVENT	SÃO JERÓNIMO DE PENHA LONGA	Cloître	?	1	C4	-	-	-	-	-	A	H	A	H	R	O	C4
Le1	Alcobaça	Alcobaça	MONASTÈRE	STA. MARIA DE ALCOBAÇA	Cloître	JC	1	C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	R	O	C4
Pg2	Arronches	Arronches	ÉGLISE	M. DE ARRONCHES, Na. Sra. da Assunção	Nef (3eh)	JC?	1+1	C4	-	-	-	-	T	C	B (fo.)	B	H	R(3)	O	C4

ID	Arrondissement	Ville	Type	Désignation	Voûte	Architectes	Clefs (1 travée)	O	Ti	Li	Co	FL	FT	O	T	L	FL	FT	Typologie	Forme
Fa1	Tavira	Luz	ÉGLISE	LUZ DE TAVIRA	Nef (3eh)	MA	1	C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	R_b-	O	C4
Be4	Beja	Santiago Maior	CATHÉDRAL	BEJA	Nef (3eh)	JR	1	C4	-	-	-	-	-	C	C	C	H+R	R+H	O	C4
Ev6	Estremoz	Santo André	ÉG. COUVENT	SÃO FRANCISCO	Chapelle droite	?	1+1	C4	-	-	-	L	-	B	B	B	H	H	O	C4
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Chapelle dos Mártires de Marrocos	Bo ? (=nef)	1	C4	-	-	-	L	-	C	B	B	H	H	O	C4
Ev6	Estremoz	Santo André	ÉG. COUVENT	SÃO FRANCISCO	Chapelle Gauche	?	1+1	C4	-	-	-	L	-	C	B	B	H	R	O	C4
Vi1	Viseu	Sta. Maria	CATHÉDRAL	VISEU	Transept	JC?	1	C4	-	-	-	L*	T*	C	B	B	H	B	O	C4
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cloître Micha-Forno de pão	JC	1	C4	-	-	-	L*	-	A	A	A	H	H	O	C4
Ev11	Évora	Sé e S. Pedro	ÉGLISE DO COUVENT	SÃO FRANCISCO	Chapelle droite	MLç + DA + FA	1	C4	-	-	-	L*	-	C	B	B	H	H	O	C4
Ev5	Estremoz	Santa Maria	CHAPELLE	Senhor dos Inocentes	Porche (3)	?	2	C4	-	-	-	L*	-	C	B	B	H	H	O	C4
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Transept	AD	1	C4	-	-	-	L*	-	C	B	B	H	H	O	C4
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Nef (3)	AD	1	C4	-	-	-	L*	-	C	B	B	H	H	O	C4
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cave	JC	1	C4	-	-	-	L*	T*	A	A	A	H	H	O	C4
Bg1	Freixo de Espada à	Freixo de Espada à Cinta	ÉGLISE	M. DE FREIXO DE ESPADA À CINTA - S.	Nef (3eh)	JC?	1+1	C4	-	-	-	L*	T*	C	B	B	H	R(3)	O	C4
Ev17	Viana do Alentejo	Alcáçovas	ÉGLISE	M. DE ALCAÇOVAS / S. SALVADOR	Nef (3eh)	?	1	C4	-	-	-	-	-	C	C	C	R	R	O	C4
Le1	Alcobaça	Alcobaça	MONASTÈRE	STA. MARIA DE ALCOBAÇA	Salle des rois (3eh)	MA	1	C4	-	-	-	-	-	C	C	C	R	R	O	C4
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Croisée dortoirs	JC	1	C4	-	-	-	L*	T*	C	A	C	R	R	O	C4
Pg2	Arronches	Arronches	ÉGLISE	M. DE ARRONCHES	Chapelle Senhora do Rosário	?	1	C4	-	-	-	L*	T*	C	A	B	R	R	O	C4
Vi1	Viseu	Sta. Maria	CATHÉDRAL	VISEU	Chapelle D. Diogo Vicente	?	1	C4	-	-	-	L*	T*	C	B	B	R	R	O	C4
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Chapelle Fundador_latérale	Hu	1	C4+C3	-	-	-	L	-	B	B	B	H	H	O	C4+C3
Be2	Beja	Salvador	COUVENT	SÃO FRANCISCO	Cloître	?	1	C4 +C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	H	O	C4+C4
Be8	Mértola	Mértola	ÉGLISE	M. DE MERTOLA - N.S. DA ASSUNÇÃO	Nef (3eh)	FP	1	C4 +C4	-	-	-	-	-	C	B	B	H	R_d	O	C4+C4
Be5	Beja	Sta. Maria da Feira	ÉGLISE	STA. MARIA DA FEIRA	Nef (3eh)	MA	1+1	C4 +C4	-	-	-	-	-	A+C	C+C	A+C	H+R	R+R	O	C4+C4
Sa4	Santarém	São Nicolau	ÉGLISE	MISERICÓRDIA	Nef (3eh)	MA	1	C4 +C4	-	-	-	-	-	C	C	C	R	R	O	C4+C4
Ev9	Évora	Santo Antão	ÉGLISE	ST. ANTÃO	Nef (3eh)	MA	1	C4 +C4	-	-	-	-	-	A	C	C	R	R	O	C4+C4

ID	Arrondissement	Ville	Type	Désignation	Voûte	Architectes	Clefs (1 travée)	O	Ti	Li	Co	FL	FT	O	T	L	FL	FT	Typologie	Forme
Se1	Moita	Alhos Vedros	CHAPELLE	M. ALHOS VEDROS ou S.LOURENÇO	Chapelle S. Sebastião	?	1+1	C4 +R6	-	-	-	L	-	C	B	B	H	H	O	C4+R6
Gu1	Guarda	Guarda	CATHÉDRAL	GUARDA	Choeur	?	1+1	C4+R6	-	-	-	L*	-	C	B	B	H	H	O	C4+R6
Br4	Guimarães	São Sebastião	COUVENT	SÃO FRANCISCO	Choeur	?	1+1	C4+R6	-	-	-	L*	-	B	-	B	H	H	O	C4+R6
Be2	Beja	Salvador	COUVENT	SÃO FRANCISCO	Choeur	?	1+1	C4+R6	-	-	-	L*	-	B	B	B	H	H	O	C4+R6
Sa5	Tomar	Santa Maria dos Olivais	ÉGLISE	STA. MARIA DO OLIVAL	Choeur		1+1	C4+R8	-	-	-	L*	-	C	B	B	H	H	O	C4+R8
Be2	Beja	Salvador	COUVENT	SÃO FRANCISCO	Salle - entrée	?	1	C8	-	-	-	-	-	B	B	B	H	H	O	C8
Ev14	Évora	Sé e São Pedro	CATHÉDRAL	ÉVORA	Croisée	?	1	R8	-	-	-	-	-	C	-	-	-	-	O	R8
Se3	Setubal	São Julião	COUVENT	JESUS	Nef (3eh)	Bo / JC?	1+(-)	C4+(-)	-	-	-	L	T	C	B	B	H	R	O+(-)	C4+(-)
Be3	Beja	Santiago Maior	ÉGLISE	MISERICORDIA	Nef (3eh)	?	1	C4+C4	-	-	-	-	-	A	C	C	H	H	O+O	C4+C4
Vi1	Viseu	Sta. Maria	CATHÉDRAL	VISEU	Nef (3eh)	JC?	1	C4+C4	-	-	-	L*	T*	C	B	B	H	B(3)	O+O	C4+C4
Lx6	Sintra	Santa Maria e São Miguel	ÉGLISE	STA. MARIA DE SINTRA	Choeur	?	1+1	C4+R6	-	-	-	-	-	C	B	B	H	B	O+O	C4+R6
Ev7	Estremoz	Veiros	ÉGLISE	M. DE VEIROS OU SÃO SALVADOR	Nef (3eh)	MA	1+2	C4+(-)	(-)+4	-	-	(-)+L	-	B	B	B	R	R	O+Ti	C4+4
Ev4	Estremoz	Santa Maria	ÉGLISE	STA MARIA	Nef (3eh)	MA; mPG	21+2	C4+(-)	(-)+4	-	-	(-)+L	T+(-)	C+(-)	C	C	R+R	R+(-)	O+Ti	C4+4
Ev11	Évora	Sé e S. Pedro	ÉGLISE DO COUVENT	SÃO FRANCISCO	Nef	ML ç+ DA + FA	2	-	4	-	-	L*	T	-	B	B	B	B	Ti	4
Le2	Cadas da Rainha	N. Sra. Do Pópulo	ÉGLISE	N. SRA. PÓPULO	Nef	MF (père et fils) + Bo	5	-	4	-	-	-	T	-	B	-	H	B	Ti	4
Ev13	Évora	Sé e São Pedro	COUVENT	LÓIOS	Nef	?	3	C4	4	-	-	L*	T	C	B	B	H	M	Ti	4
Ev8	Évora	Malagueira	COUVENT (Chapître)	SÃO BENTO DE CÁSTRIS	Porche	EL?	5	C4	4	-	-	L*	T	B	B	B	R	R	Ti	4
Ev16	Mora	Pavia	ÉGLISE	M. DE PAVIA	Choeur	?	3	C4	4	-	-	L*	T	A	B	B	R	R	Ti	4
Le2	Cadas da Rainha	N. Sra. Do Pópulo	ÉGLISE	N. SRA. PÓPULO	Choeur	MF (père et fils) + Bo	13	-	Co8	-	-	L	T	-	-	-	R	R	Ti	Cu8r
Bg4	Torre de Moncorvo	Torre de Moncorvo	ÉGLISE	M. DE MONCORVO - N. SRA ASSUNÇÃO OU	Narthex latérale	JC?	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	B	B	Ti	E4
VC1	Caminha	Matriz	ÉGLISE	M. DE CAMINHA	Chapelle da Piedade	TT,FF,PG	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	B	B	Ti	E4
Be2	Beja	Salvador	COUVENT	SÃO FRANCISCO	Réfectoire	?	5	C4	E4	-	-	L	T	A	B	A	B	B	Ti	E4
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Chapelle de São Miguel	Bo ?	1	C4	E4	-	-	L	T	A	B	B	B	B	Ti	E4
Sa1	Ferreira do Zezere	Areias	ÉGLISE	M. DE AREIAS / N.Sra. da GRAÇA	Choeur	JC?	5	C4	E4	-	-	L*	T*	C	B	B	B	B	Ti	E4

ID	Arrondissement	Ville	Type	Désignation	Voûte	Architectes	Clefs (1 travée)	O	Ti	Li	Co	FL	FT	O	T	L	FL	FT	Typologie	Forme
Ev13	Évora	Sé e São Pedro	COUVENT	LÓIOS	Sale Diana	?	5	C4	E4	-	-	L	T	A	A	A	H	H	Ti	E4
Ev1	Alandroal	N. Sra da Conceição	ÉGLISE	M. DE NOSSA SENHORA DA CONCEIÇÃO	Nef	?	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	H	B	Ti	E4
Ev7	Estremoz	Veiros	ÉGLISE	M. DE VEIROS OU SÃO SALVADOR	Narthex (3)	MA	5	C4	E4	-	-	L	T	A	C	B	H	B	Ti	E4
Se2	Santiago do Cacém	Santiago do Cacém	ÉGLISE	M. DE SANTIAGO DO CACÉM	Choeur	?	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	H	B	Ti	E4
Pg3	Crato	Flor da Rosa	MONASTÈRE	FLOR DA ROSA	Nef-Entrée	?	5	C4	E4	-	-	L	T	A	A	A	H	H	Ti	E4
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Noviciado-couloir centre (7)	JC	5	C4	E4	-	-	L	T	A	A	A	H	H	Ti	E4
Pg3	Crato	Flor da Rosa	MONASTÈRE	FLOR DA ROSA	Cloître	?	5	C4	E4	-	-	L	T	A	A	A	H	H	Ti	E4
Pg6	Portalegre	Sé	CATHÉDRAL	PORTALEGRE	Chapelle	AA	5	C4	E4	-	-	L	T	A	B	B	H	H	Ti	E4
Se3	Setubal	São Julião	COUVENT	JESUS	Cloître	Bo / JC?	5	-	E4	-	-	L	T	-	A	A	H	R	Ti	E4
Ev12	Évora	Sé e S. Pedro	ÉGLISE DO COUVENT	SÃO FRANCISCO (capela dos Ossos)	Chapelle Gauche	MLç + DA + FA	4	C4	E4	-	-	L*	T	C	B	C	H	B	Ti	E4
Pg3	Crato	Flor da Rosa	MONASTÈRE	FLOR DA ROSA	Salle/Réfectoire (8)	?	5	C4	E4	-	-	L	T	A	A	A	H	H	Ti	E4
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Narthex	JC	5	C4	E4	-	-	L*	T*	A	A	A	H	H	Ti	E4
Be7	Cuba	Vila Ruiva	ÉGLISE	M. DE VILA RUIVA - N.SRA. DA ENCARNAÇÃO	Nef	TF?	5	C4	E4	-	-	L*	T	C	C	B	H	R	Ti	E4
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Bibliothèque	MP (JC-ouvriers	5	C4	E4	-	-	L*	T	A	B	B	H	R	Ti	E4
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Cloître étage	Bo / JC	5	C4	E4	-	-	L*	T*	C	B	B	H	R	Ti	E4
Br2	Barcelos	Barcelos	ÉGLISE	M. DE BARCELOS_STA MARIA MAIOR	Chapelles Choeur	?	1	C4	E4	-	-	-	-	C	B	B	R	R	Ti	E4
Br3	Braga	Braga	CATHÉDRAL	BRAGA	Porche	JC?	4	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	R	B	Ti	E4
Lx2	Lisboa	Santa Maria de Belém	CHAPELLE	SÃO JERÓNIMO	Choeur	RAf	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	R	B	Ti	E4
Br1	Barcelos	Areias de Vilar	MONASTÈRE	VILAR DOS FRADES OU IG. SÃO SALVADOR	Chapelles Nef (10)	JC / mJ?	5	C4	E4	-	-	L	T	A	A	A	R	R	Ti	E4
Br2	Barcelos	Barcelos	ÉGLISE	M. DE BARCELOS_STA MARIA MAIOR	Choeur	?	5	C4	E4	-	-	L	T	B	B	B	R	R	Ti	E4
Px4	Vila do Conde	Vila do Conde	ÉGLISE	M. DE VILA DO CONDE / SÃO JOÃO BAPTISTA	Chapelle droite	JRi,SG,RGP, JC	5	C4	E4	-	-	L	T	B	B	B	R	R	Ti	E4
Be8	Mértola	Mértola	ÉGLISE	M. DE MERTOLA - N.S. DA ASSUNÇÃO	Choeur	FP	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	R	R	Ti	E4
Br4	Guimarães	São Sebastião	COUVENT	SÃO FRANCISCO	Chapelle droite	?	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	R	R	Ti	E4
Gu1	Guarda	Guarda	CATHÉDRAL	GUARDA	Croisée	?	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	R	R	Ti	E4

ID	Arrondissement	Ville	Type	Désignation	Voûte	Architectes	Clefs (1 travée)	O	Ti	Li	Co	FL	FT	O	T	L	FL	FT	Typologie	Forme
Sa3	Santarém	Marvila	ÉGLISE	STA. MARIA DE MARVILA	Chapelles	JC?	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	R	R	Ti	E4
Se1	Moita	Alhos Vedros	CHAPELLE	M. ALHOS VEDROS ou S.LOURENÇO	Chapelle S. João Baptista	?	5	C4	E4	-	-	L	T	C	B	B	R	R	Ti	E4
Be7	Cuba	Vila Ruiva	ÉGLISE	M. DE VILA RUIVA - N.SRA. DA ENCARNAÇÃO	Choeur	TF?	5	C4	E4	-	-	L	T	C	C	B	R	R	Ti	E4
Pg1	Arronches	Arronches	ÉGLISE	MISERICORDIA	Choeur	?	5	C4	E4	-	-	L	T	C	C	C	R	R	Ti	E4
Le3	Leiria	Leiria	CATHÉDRAL	LEIRIA	Nef (3eh)	AA	5+1	C4 +C4	E4+(-)	-	-	L*	T*	C	C	C	R	R	Ti	E4+(-)
Pg6	Portalegre	Sé	CATHÉDRAL	PORTALEGRE	Narthex (3)	AA	9+5	C4	E4+E4	-	-	L+(-)	T+(-)	A	A	A	H	H	Ti	E4+E4
Lx1	Lisboa	Belém	TOUR AVEC CHAPELLE	TORRE DE BELÉM	Chapelle (5eme étage)	FA	9	-	E6	-	-	L	T	-	B	B	B	B	Ti	E6
Co2	Coimbra	St. António dos Olivais	MONASTÈRE	CELAS	Choeur	?	9	R8	E8	-	-	L	T	C	B	B	B	B	Ti	E8
Ev5	Estremoz	Santa Maria	CHAPELLE	Senhor dos Inocentes	Nef	?	9	R9	E8	-	-	L	T	C	B	B	B	B	Ti	E8
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Chapitre	Hu	5	C12	E8	-	-	L	T	B	-	-	R	R	Ti	E8
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Chapelle Fundador	Hu	9	R8	E8	-	-	L	T	-	-	-	_	_	Ti	E8r
Ev16	Mora	Pavia	ÉGLISE	M. DE PAVIA	Nef (3eh)	?	3+1	C4	4+(-)	-	-	L*	T	A+C	B	C+ B	R	R	Ti+O	4+C4
Ev13	Évora	Sé e São Pedro	COUVENT	LÓIOS	Choeur	?	5+2	C4+R6	4+(-)	-	-	L*	T	C	B	B	H	M	Ti+O	4+6r
Pg2	Arronches	Arronches	ÉGLISE	M. DE ARRONCHES	Narthex (3)	JC?	5+1	C4	E4+(-)	-	-	L+L*	T+T*	A	A	A	H	R	Ti+O	E4+C4
Be1	Alvito	Alvito	ÉGLISE	M. DO ALVITO - N. Sra. da Assunção	Transept (3)	JA	5+1	C4+C4	E4+(-)	-	-	L+(-)	T+(-)	C	B	B	H	B+R	Ti+O	E4+C4
Be1	Alvito	Alvito	ÉGLISE	M. DO ALVITO - N. Sra. da Assunção	Nef (3)	JA	5	C4+C4	E4+(-)	-	-	L+(-)	T+(-)	C	B	B	H	B+R	Ti+O	E4+C4
Pg5	Elvas	Assunção	CATHÉDRAL	ELVAS OU IG. N. SRA ASSUNÇÃO	Nef (3)	FA	5+1	C4	E4+(-)	-	-	L+(-)	T+(-)	C	B	B	B	B	Ti+O	E4+C4
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Cloître du Silence	MP (JC-ouvriers	5+13	-	E4	-	(-)+Qb4	L	T	-	B	B	Rb	R	Ti+Co	E4 +Qb4
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Vestibule	JC?	21	-	E+	E+	-	L*	T	-	B	B	H	H	Li	E+
Be9	Moura	São João Baptista	ÉGLISE	M. DE MOURA - S. JOÃO BAPTISTA	Choeur	CA	6	C4	E4	E1	-	L	T	C	B	B	H	B	Li	E1
Sa2	Golegã	Golegã	ÉGLISE	M. DA GOLEGÃ / N.SRA. da CONCEIÇÃO	Choeur	?	6	C4	E4	E1	-	L	T	C	B	B	H	R	Li	E1
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Chapelles Imparfaites (2B)	Hu	8	-	E6	E1	-	L	T	-	B	-	R	R	Li	E1
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Nef	Bo	7	-	E4	E2	-	-	T	-	B	B	H	B	Li	E2
Lx4	Lisboa	Santa Maria de Belém	CHAPELLE	SANTO CRISTO	Choeur		7	O	E4	E2	-	-	T*	-	A	A	H	H	Li	E2

ID	Arrondissement	Ville	Type	Désignation	Voûte	Architectes	Clefs (1 travée)	O	Ti	Li	Co	FL	FT	O	T	L	FL	FT	Typologie	Forme
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Chapelle São Teotónio	Bo ? (=nef)	7	-	E4	E2	-	-	T	-	B	B	H	R	Li	E2
Ev11	Évora	Sé e S. Pedro	ÉGLISE DO COUVENT	SÃO FRANCISCO	Choeur	MLç + DA + FA	7	C4	E4	E2	-	L*	T	C	B	B	H	M	Li	E2
Ev3	Arraiolos	Vimieiro	ÉGLISE	M. DO VIMIEIRO	Nef	?	7	C4	E4	E2	-	L	T	C	B	C	R	R	Li	E2
Lx2	Lisboa	Santa Maria de Belém	CHAPELLE	SÃO JERÓNIMO	Nef	Raf	9	C4	E4	E4	-	-	-	C	B	B	R	B	Li	E4
Ev14	Évora	Sé e São Pedro	CATHÉDRAL	ÉVORA	Chapelle Transept	?	9	C4	E4	E4	-	-	-	C	B	B	R	R	Li	E4
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Réfectoire	LV / JC	9	C4	E4	E4	-	-	-	-	A	A	R	R	Li	E4
Ev13	Évora	Sé e São Pedro	COUVENT	LÓIOS	Porche	?	11	O	E4	E4	-	L	-	A	A	A	R	R	Li	E4
Pg1	Arronches	Arronches	ÉGLISE	MISERICORDIA	Nef	?	9	C4	E4	E4	-	-	-	A	A	A	R	R	Li	E4
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Chapelle de Jesús	DC / JC?	9	C4	E4	E4	-	-	-	A	A	A	R	R	Li	E4
Pg4	Elvas	Ajuda, Salvador e Santo Ildefonso	ÉGLISE	SÃO DOMINGOS	Sacristie	?	13	C4	E4	E4//	-	L	T	C	B	B	B	B	Li	E4//
Co4	Gois	Gois	ÉGLISE	M. DE GOIS	Choeur	DC/DT	13	C4+R4	E4+(-)	E4//	-	L	T	C	B	B	R	R	Li	E4//+4r
Ev13	Évora	Sé e São Pedro	COUVENT	LÓIOS	Narthex	?	11	O	E4	E4	-	L	-	A	A	A	R	H	Li	E5
Bg4	Torre de Moncorvo	Torre de Moncorvo	ÉGLISE	M. DE MONCORVO - N. SRA ASSUNÇÃO OU	Narthex centrale	JC?	5	C4	4	F4	-	L	T	C	B	B	B	B	Li	F4
Ev10	Évora	Santo Antão	MONASTÈRE	SÃO DOMINGOS (comerce)	Salle (3)	NC	4	-	E4	F4	-	L	-	-	A	B	H	H	Li	F4
Br1	Barcelos	Areias de Vilar	MONASTÈRE	VILAR DOS FRADES OU IG. SÃO SALVADOR	Nef	JC / mJ?	11	C4	E4+	F4	-	L*	T	C	B	B	H	B	Li	F4
Br1	Barcelos	Areias de Vilar	MONASTÈRE	VILAR DOS FRADES OU IG. SÃO SALVADOR	Choeur	JC / mJ?	9	C4	E4	F4	-	L*	T*	C	B	B	H	R	Li	F4
Pg2	Arronches	Arronches	ÉGLISE	M. DE ARRONCHES	Chapelle Chagas (nord)	?	4	-	-	F4	-	-	-	-	C	C	R	R	Li	F4
Br1	Barcelos	Areias de Vilar	MONASTÈRE	VILAR DOS FRADES OU IG. SÃO SALVADOR	Croisée	JC / mJ?	11	C4	E4+	F4	-	L*	T*	C	B	B	R	R	Li	F4
Le1	Alcobaça	Alcobaça	MONASTÈRE	STA. MARIA DE ALCOBAÇA	Accès sacristie	JC	9	-	E5	F6	-	L*	T	-	-	-	H	H	Li	F6
VC3	Viana do Castelo	Santa Maria Maior	ÉGLISE	M. DE VIANA DO CASTELO	Chapelle gauche_Nef	?	9	C4	E4	F8	-	L*	T*	C (2)	B	B	B	B	Li	F8
Pg3	Crato	Flor da Rosa	MONASTÈRE	FLOR DA ROSA	Sacristie?	?	9	C4	4	F8	-	L	T	C	B	B	H	H	Li	F8
Ev14	Évora	Sé e São Pedro	CATHÉDRAL	ÉVORA	Narthex	DA	9	C4	E4	F8	-	-	-	A	A	A	R	R	Li	F8
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Cloître	Bo / JC	9	C4	E4	F8	-	L*	T*	A	Ab	Ab	R	R	Li	F8
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Chapelle Sud	Bo / JC	9	C4	E4	F8	-	L*	T*	A	Ab	Ab	R	R	Li	F8

ID	Arrondissement	Ville	Type	Désignation	Voûte	Architectes	Clefs (1 travée)	O	Ti	Li	Co	FL	FT	O	T	L	FL	FT	Typologie	Forme
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Cloître nord	Bo / JC	9	C4	E4	F8	-	L*	T*	A	Ab	Ab	Rb	R	Li	F8
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Chapelle nord	Bo / JC	9	C4	E4	F8	-	L*	T*	C	B	B	Rb	R	Li	F8
Px3	Vila do Conde	Azurara	ÉGLISE	M. DE AZURARA OU STA MARIA	Choeur	GL	5+3	C4	4	R1	-	L	T	C	B	B	R	R	Li	R1
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Choeur	Bo	7	C4	E4	R2	b1	-	T	C	B	B	H	R	Li	R2
Ev2	Arraiolos	Arraiolos	COUVENT	LÓIOS	Nef	RA,Jál,JS	5	C4	E4	R2	-	L	T	C	B	B (interro	H	B	Li	R2
Sa7	Vila Nova da Barquinha	Atalaia	ÉGLISE	ATALAIA	Choeur	JC?	13	C4+R4	E4+E4r	E4//+E2r	-	L	T	C	B	B	R_b2	R	Li+Ti	E4//+E2r
Bg4	Torre de Moncorvo	Torre de Moncorvo	ÉGLISE	M. DE MONCORVO - N. SRA ASSUNÇÃO OU	Nef (3eh)	JC?	5+3	C4+(-)	(-)+4	F4+4	-	L*	T*	C	B	B	H	R(3)	Li+Ti	F4+4
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Narthex (travée centrale 4)	?	5	C4	E4	-	8c,*	L	T	A	B	A	R	R	Co	8c,*
Px4	Vila do Conde	Vila do Conde	ÉGLISE	M. DE VILA DO CONDE / SÃO JOÃO BAPTISTA	Chapelle gauche	JRi,SG,RGP, JC	4	C4	E4	-	c	-	-	C	B	B	(lucarne)	(lucarne)	Co	c
Vi1	Viseu	Sta. Maria	CATHÉDRAL	VISEU	Chapelle Tércea	?	1	C4	E4*	-	c	L	T	C	B	B	H	H	Co	c
VC1	Caminha	Matriz	ÉGLISE	M. DE CAMINHA	Absidiole (droite)	TT,FF,PG	9	C4	E4	-	c	L	T	C	B	B	R	B	Co	c
Ev2	Arraiolos	Arraiolos	COUVENT	LÓIOS	Chapelle droite	RA,Jál,JS	9	C4	E4	-	c	L	T	C	B	B	R	R	Co	c
Br1	Barcelos	Areias de Vilar	MONASTÈRE	VILAR DOS FRADES OU IG. SÃO SALVADOR	Chapelle Gauche_Transepte	JC / mJ?	9	C4	E4	-	c	L	T	C (2)	C	C	R	R	Co	c
VC2	Ponte Lima	Ponte Lima	ÉGLISE	M. DE PONTE DE LIMA	Chapelle	?	9	C4	E4	-	c	L*	T*	C	B	B	R	R	Co	c
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Choeur_Église S.João das Donas	DC / JC?	9	C4	E4	-	c, *	L	T	A	B	B	R	R	Co	c, *
Px1	Porto	São Nicolau	ÉGLISE COUVENT	SÃO FRANCISCO	Chapelle	DC	17	C4	E4	-	c, Qb4	L	T	C	B	B	B	B	Co	c, Qb
Br3	Braga	Braga	CATHÉDRAL	BRAGA (Chapelle N. Sra do Livramento)	Choeur	JC	17+9	C4+(-)	E4+E4r	-	c,Qa8,*	L	T	C	B	B	R	R	Co	c,Qa8,*+R4
Px4	Vila do Conde	Vila do Conde	ÉGLISE	M. DE VILA DO CONDE / SÃO JOÃO BAPTISTA	Chapelle droite_Transepte	JRi,SG,RGP, JC	17	C4	E4	-	c,Qb4	L	T	B	B	B	B	B	Co	c,Qb
VC1	Caminha	Matriz	ÉGLISE	M. DE CAMINHA	Chapelle Bom Jesús dos Mareantes	TT,FF,PG	17	C4	E4	-	c,Qb4	L*	T*	C (2)	B	B	B	B	Co	c,Qb
VC1	Caminha	Matriz	ÉGLISE	M. DE CAMINHA	Choeur	TT,FF,PG	17+3	C4+R4	E4+E2r	-	c,Qb4,*	L*	T*	C (2)	B	B	R_b2	Rq	Co	c,Qb,*+6r
Ev14	Évora	Sé e São Pedro	COUVENT	LÓIOS	Chapître	?	13	C4	E4	-	C,Qd	L	T	A	A	A	R	R	Co	c,Qd
Vi1	Viseu	Sta. Maria	CATHÉDRAL	VISEU	Narthex	JC?	5	C4	E4+(-)	-	c+Qa2,Qd2	L*+(-)	T*+(-)	A	A	A	R	R	Co	c+Qa2,Qd2
Bg1	Freixo de Espada à	Freixo de Espada à Cinta	ÉGLISE	M. DE FREIXO DE ESPADA À CINTA - S.	Chapelles Choeur	?	5	C4	-	-	F4	-	-	C	C	C	R	R	Co	F4
Px2	Porto	Sé	CATHÉDRAL	PORTO	Croisée	JC?	5	C4	E4	-	F4	L	T	C	B	B	R	R	Co	F4

ID	Arrondissement	Ville	Type	Désignation	Voûte	Architectes	Clefs (1 travée)	O	Ti	Li	Co	FL	FT	O	T	L	FL	FT	Typologie	Forme
Bg2	Freixo de Espada à	Freixo de Espada à Cinta	ÉGLISE	MISERICORDIA	Choeur	JC?	15	C4	E4+	-	F4,Qd2	L	-	C	B	B	H	H	Co	F4,Qd2
Ev15	Montemor-o-Novo	N. Sra da Vila	COUVENT	SÃO FRANCISCO	Sacristie	?	1	C4	-	-	Qa	L	T	A	A	A	H	H	Co	Qa
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Nef_Église S.João das Donas	DC / JC?	5	C4	-	-	Qa4	-	-	A	B	C	R	R	Co	Qa
Ev2	Arraiolos	Arraiolos	COUVENT	LÓIOS	Choeur	RA,Jál,JS	5	C4	4	-	Qa4	L	T	C	B	B	R	B	Co	Qa
Br4	Guimarães	São Sebastião	COUVENT	SÃO FRANCISCO	Chapelle Gauche	?	13	C4	E4	-	Qa4	L	T	C	B	B	R	R	Co	Qa
VC1	Caminha	Matriz	ÉGLISE	M. DE CAMINHA	Absidiole (gauche)	TT,FF,PG	5	C4	E4	-	Qa4,c4	-	-	C	B	B	R	R	Co	Qa,c4
Br1	Barcelos	Areias de Vilar	MONASTÈRE	VILAR DOS FRADES OU IG. SÃO SALVADOR	Chapelle Droite_Transepte	JC / mJ?	13	C4	E4	-	Qa4,F4,c	L*	T*	C	B	B	R	R	Co	Qa,F4,c
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Nef	JC	17	C4	E4	-	Qb4	L	T	C	B	B	R	R	Co	Qb
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Sacristie	Bo / JC	13	C4	E4	-	Qb4	L	T	A	A	A	R	R	Co	Qb
Bg1	Freixo de Espada à	Freixo de Espada à Cinta	ÉGLISE	M. DE FREIXO DE ESPADA À CINTA - S.	Choeur	JC?	9	C4	E4	-	Qb4	L	T	C	B	B	R	R	Co	Qb
Co3	Coimbra	Sta. Cruz	COUVENT	STA. CRUZ	Narthex	DC / JC?	13	C4	E4	-	Qb4	L	T	A	B	B	R	R	Co	Qb
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Narthex (travée sud 5)	Bo / JC	5	C4	E4	-	Qb4	L	T	B	B	B	Rb	R	Co	Qb
Sa3	Santarém	Marvila	ÉGLISE	STA. MARIA DE MARVILA	Choeur	JC?	17	C4	E4	-	Qd4	L	T	B(2)	B	B	R	R	Co	Qd
Lx4	Lisboa	Santa Maria de Belém	CHAPELLE	SANTO CRISTO	Nef	Bo / JC?	9	-	E4	E4	c	-	-	-	A	A	H	H	Co*	c,E4
Pg6	Portalegre	Sé	CATHÉDRAL	PORTALEGRE	Nef (3eh)	AA	17+5	C4	E4+(-)	(-)+F4	c4,B4 +c4	L+(-)	T+(-)	A	C	C	H	H	Co*	F4,Qb+F4
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Narthex (travée centrale 6)	Bo / JC	9	C4	E4	F8	Qb4	L	T	A	B	A	R	R	Co*	F8,Qb
Px4	Vila do Conde	Vila do Conde	ÉGLISE	M. DE VILA DO CONDE / SÃO JOÃO BAPTISTA	Choeur	JRi,SG,RGP, JC	18+3	C4+R4	E4	-	Qad	L	T	C (2)	B	B	R_b2	R	Co+O	Qad+6r
Se3	Setubal	São Julião	COUVENT	JESUS	Choeur	Bo / JC?	9+3	C4+R4	E4+E4r	-	Qb4	L	T	C	B	B	R_b2	R	Co+Ti	Qb+4r
Ev2	Arraiolos	Arraiolos	COUVENT	LÓIOS	Cloître	RA,Jál,JS	4	Cp(4C)	-	-	-	-	-	A	C	-	H	R	Cp (O)	4C (2x1)+
Sa5	Tomar	Santa Maria dos Olivais	ÉGLISE	STA. MARIA DO OLIVAL	Sacristie	JC?	5	Cp(4C)	-	-	-	-	-	A	A	A	H	H	Cp (O)	4C (2x2)
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Passage Chapître	JC	9	Cp(4C)	-	-	-	3L*	3T*	A	A	A	H	H	Cp (O)	4C (2x2)
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Choeur	Hu	1+1	Cp(4C)+R4	-	-	-	L*	-	C	B	B	H	H	Cp (O)+O	4C (2x1)+4r
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Transept	Bo / JC	117	Cp(6C)	6E	6F4	c+	3L*	3T*	B,A	A	A	R	B	Cp (O-*)	6C,E (3x2)
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cloître Principale-latérale sudoeste	JC	2	Cp(2C)	Cp(2C)	-	-	L	-	C	C	C	H	H	Cp (O-Ti)	2C (2x1)

ID	Arrondissement	Ville	Type	Désignation	Voûte	Architectes	Clefs (1 travée)	O	Ti	Li	Co	FL	FT	O	T	L	FL	FT	Typologie	Forme
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Escalier Cl.Barbara/Principal	JC	5	Cp(4C)	Cp(4C)	-	-	-	-	A	B	B	H	H	Cp (O-Ti)	4C (2x1)
Pg3	Crato	Flor da Rosa	MONASTÈRE	FLOR DA ROSA	Salle	?	5	C4	-	Cp(4C)	-	-	-	A	A	A	H	H	Cp (O-Li)	4C (1x1)
Pg3	Crato	Flor da Rosa	MONASTÈRE	FLOR DA ROSA	Salle	?	5	C4	-	Cp(4C)	-	-	-	A	A	A	H	H	Cp (O-Li)	4C (1x1)
Le3	Leiria	Leiria	CATHÉDRAL	LEIRIA	Chapelle	BA + Frei João	5	C4	-	Cp(4C)	-	-	-	C	C	C	R	R	Cp (O-Li)	4C (1x1)
Fa1	Tavira	Luz	ÉGLISE	LUZ DE TAVIRA	Choeur	MA (portal S. , atr.)	4	C4	-	Cp(4C)	-	-	-	C	C	C	R	R	Cp (O-Li)	4C (1x1)
Be3	Beja	Santiago Maior	ÉGLISE	MISERICORDIA	Nef (3ème travée) (3eh)	?	5	C4	-	Cp(4C)	-	-	-	C	A	C	R	R	Cp (O-Li)	4C (1x1)
Bg3	Miranda do Douro	Miranda do Douro	ÉGLISE	M. DE MIRANDA DO DOURO (ANTIGA Sé)	Nef (3eh)	PF+MA	1+1	C4	-	Cp(4C)	-	L*	T*	C	C	C	R	R	Cp (O-Li)	4C (1x1)
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Librairie	JC	5	C4	-	Cp(4C)	-	3L*	-	A	A	C	H	R	Cp (O-Li)	4C (1x1)+
Ev2	Arraiolos	Arraiolos	COUVENT	LÓIOS	Porche	RA,Jál,JS	-	Cp(4C)	-	-	-	-	-	A	C	A	H	R	Cp (O-T)	4C (2x1)+
Lx6	Sintra	Santa Maria e São Miguel	ÉGLISE	STA. MARIA DE SINTRA	Narthex	?	2	-	Cp(2C)	-	-	L	-	-	A	C	H	H	Cp (Ti)	2C (1x1)
Sa5	Tomar	Santa Maria dos Olivais	ÉGLISE	STA. MARIA DO OLIVAL	Chapelles	JC?	2	-	Cp(2C)	-	-	L	-	-	A	A	H	H	Cp (Ti)	2C (1x1)
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cloître Hospedaria - Celeiro	JC	2	-	Cp(2C)	-	-	L	-	-	A	A	H	H	Cp (Ti)	2C (1x1) +
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cuisine	JC	2	-	Cp(2C)	-	-	L	-	-	A	A	H	H	Cp (Ti)	2C (1x1) +
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cloître Hospitalier	JC	2	-	Cp(2C)	-	-	L	-	-	A	A	H	H	Cp (Ti)	2C (1x1) +
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cloître Micha	JC	2	-	Cp(2C)	-	-	L	-	-	A	A	H	H	Cp (Ti)	2C (1x1) +
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cloître Corvos	JC	2	-	Cp(2C)	-	-	L	-	A	A	A	H	H	Cp (Ti)	2C (1x1) +
Le4	Leiria	Batalha	MONASTÈRE	STA. MARIA DA VITÓRIA	Chapelles Imparfaites (2A)	Hu	3	R3	Cp(2C)	-	-	L*	-	B	B	B	H	R	Cp (Ti)+O	2C (1x1)+3r
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Cloître Principal-latérale sud	JC	3	-	Cp(2C)	-	-	L*	2T*	-	A	C	H	H	Cp (Ti-*)	2C (1x1)
Ev14	Évora	Sé e São Pedro	CATHÉDRAL	ÉVORA	Porche cloître	?	9	-	Cp 2(C,E)	-	-	L	T*	A	B	B	R	R	Cp (Ti-*)	2C,E (1x1)
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Narthex (travée sud et nord 3)	Bo / JC	6+6	-	Cp 2(C,E)	E1	-	L	T*	-	B	B	R	R	Cp (Ti-*)	2C,E (1x1)
Lx3	Lisboa	Santa Maria de Belém	MONASTÈRE	JERONIMOS	Nef (3eh)	Bo / JC	7+9+7	-	E4+	Cp (E+)	F8,F4,F5	-	-	-	A (fo)	B (fo)	H	R(3)	Cp (Li*)	E+
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Réfectoire	JC	-	-	-	-	-	-	-	-	H	A	H	R	Cp (L-T)	Ca //murs
Sa6	Tomar	Tomar	COUVENT	CRISTO	Noviciado-couloir N/S (2)	JC	-	-	-	-	-	-	-	-	H	A	H	R	Cp (L-T)	Ca //murs
VC2	Ponte Lima	Ponte Lima	ÉGLISE	M. DE PONTE DE LIMA	Choeur	ML	-	-	-	-	-	-	-	-	H	C	H	R	Cp (L-T)	Ca //murs

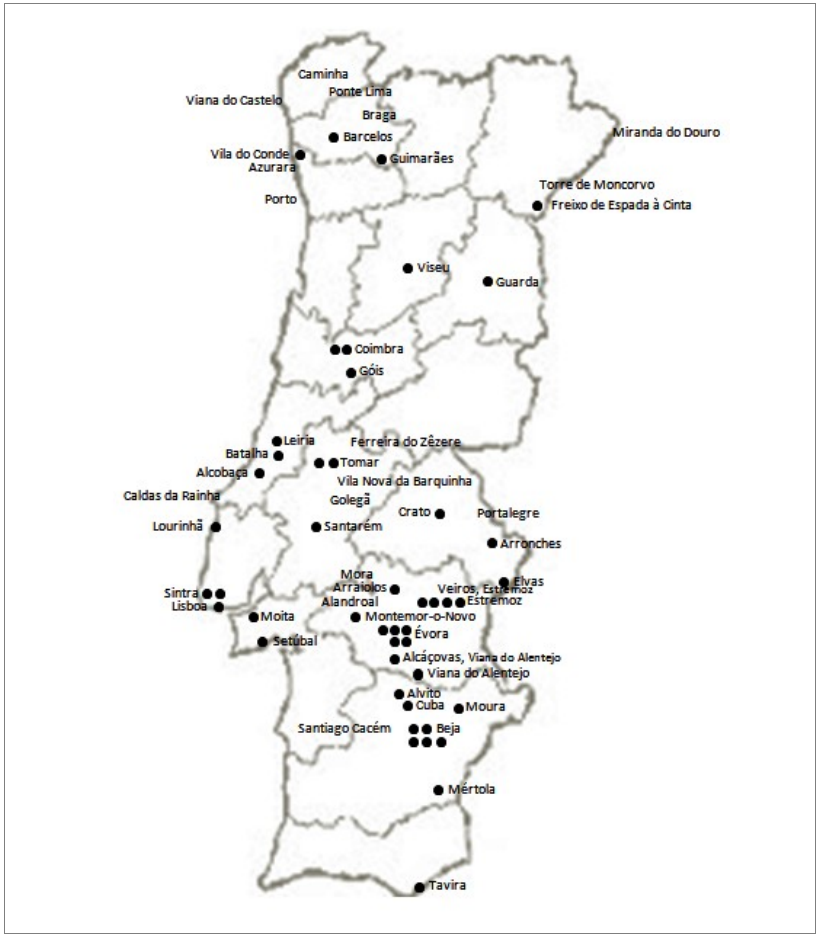


Figure 102. Carte de localisation des voûtes d'ogives analysées au Portugal

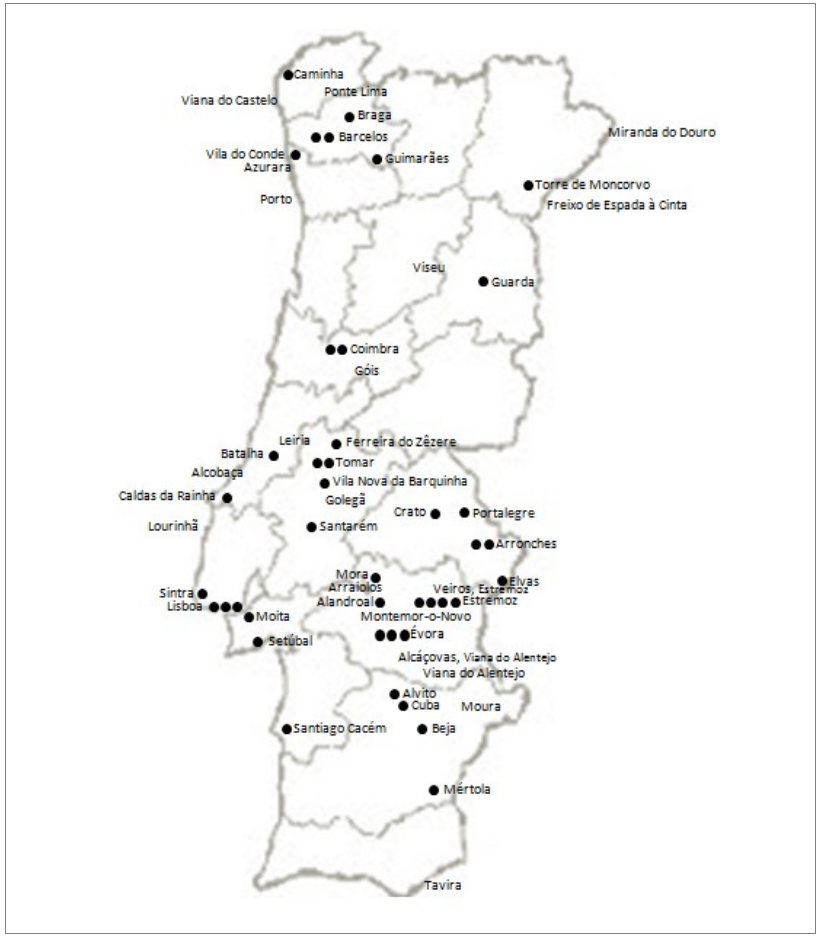


Figure 103. Carte de localisation des voûtes à tiercerons analysées au Portugal



Figure 104. Carte de localisation des voûtes à liernes analysées au Portugal



Figure 105. Carte de localisation des voûtes à combados analysées au Portugal

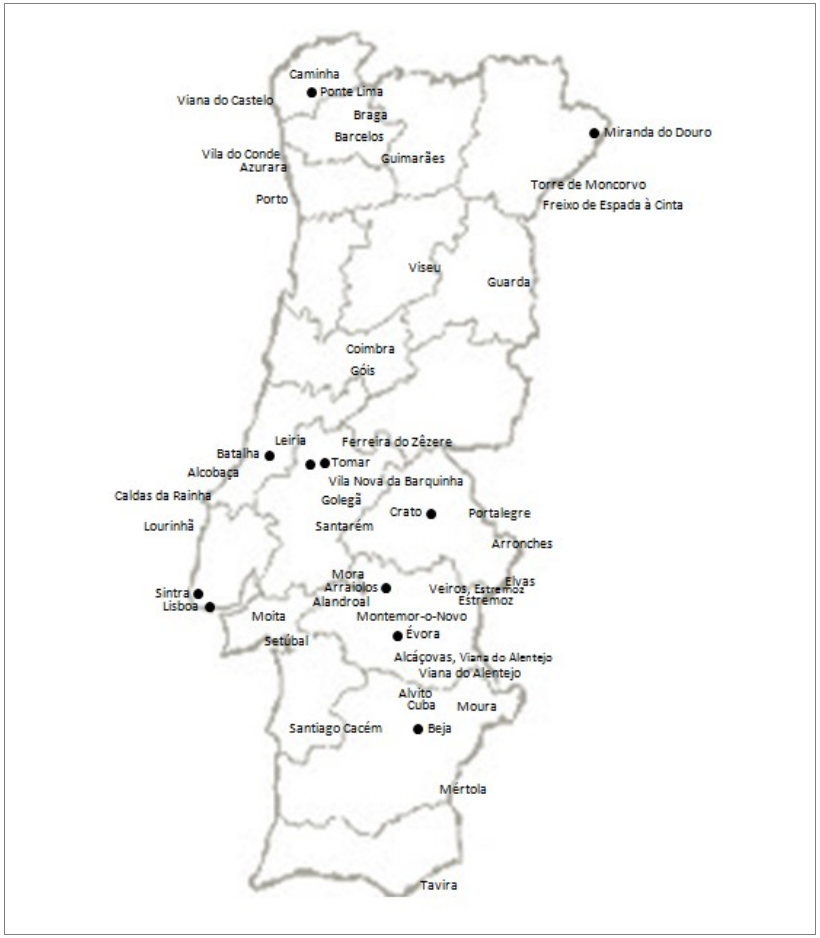


Figure 106. Carte de localisation des voûtes à nervures composées analysées au Portugal

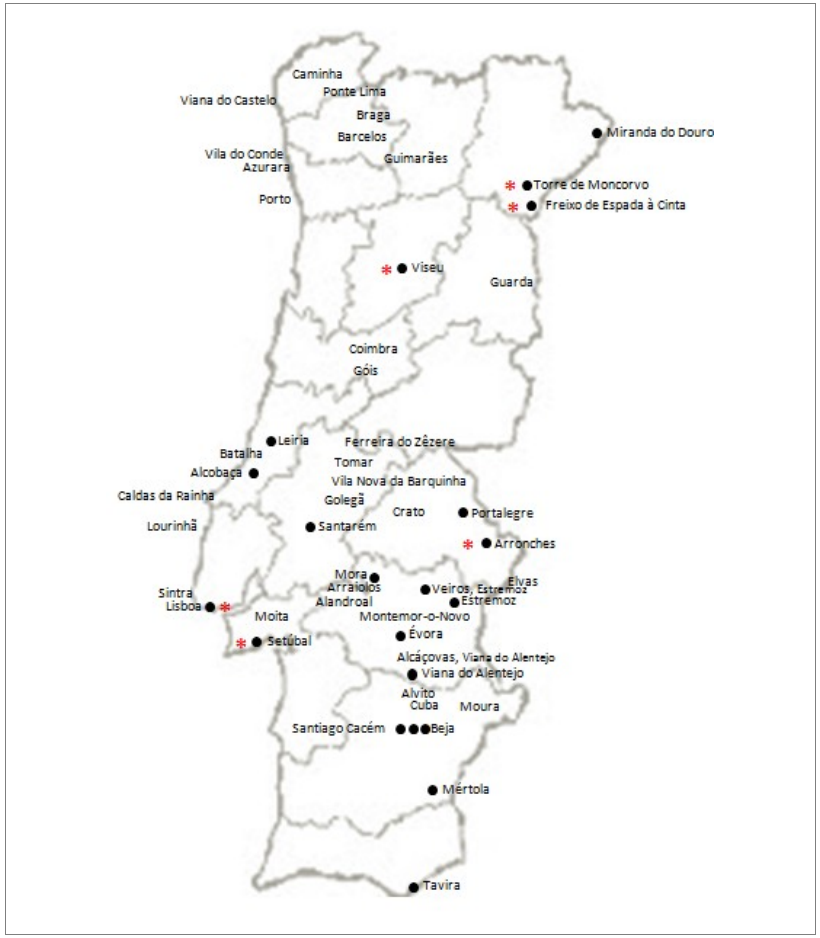


Figure 107. Carte de localisation des églises-halles analysées au Portugal; * voûtes de João de Castilho

Conclusions

Ce chapitre était fondamental pour comprendre les méthodes de tracé et de construction des voûtes en Europe et les systèmes nervurés au Portugal, analysés à partir de la typologie que nous avons créée.

La typologie des voûtes varie d'un pays à l'autre et leurs formes changent en fonction des méthodes de tracé.

La France, plus conservatrice, conserve la structure en croisée d'ogives jusqu'aux derniers jours du gothique. Pour cette raison ce pays n'a pas d'emblée constitué notre objet d'étude privilégié.

Il existe cependant en France un type de voûtes que s'est révélé important dans le cadre de notre étude : la voûte à nervures composées, en croisé d'ogives. Ce système de croisement d'ogives principales et secondaires permet de surhausser la voûte et de couvrir de plus grandes portées, comme l'observe Viollet-le-Duc.

À l'origine, le but recherché par les bâtisseurs était probablement de relever la voûte et d'obtenir une forme cupulaire comme celle des voûtes angevines et aquitaines, par exemple la voûte de Moulhierne. Pendant le gothique tardif, ce système fut repris en vue d'augmenter la portée de la voûte et de créer des formes continues entre les travées.

En France, le tracé des nervures suit habituellement un arc de cercle centré au niveau de l'imposte. Les nervures ont alors des rayons différents afin d'atteindre la hauteur de clef souhaitée.

D'autres principes sont aussi utilisés comme le montre un croquis de Villard de Honnecourt, qui témoigne d'un tracé de voûte dont les arcs ont tous le même rayon. Pour atteindre la hauteur de clef souhaitée, on surélève ou on rabaisse la naissance de chaque arc.

En Angleterre, on voulait conserver une ligne faîtière de hauteur constante (la *ridge line*) et pour éviter la forme de reins jugée inesthétique obtenue par la méthode précédente – les architectes anglais introduisirent les nervures à deux centres (formant des arcs à quatre centres). Les naissances de ces arcs composés restaient ainsi à un même niveau sur l'imposte, avec un petit arc identique pour toutes les nervures et des grands arcs variables permettant d'atteindre la clef. Pour atteindre la hauteur désirée, on élève ou on abaisse le seul arc principal par deux moyens : soit on trace le grand arc avec des rayons différents, en fonction de la longueur de la nervure, soit on garde le même rayon, en le faisant pivoter autour du centre du petit arc.

L'Angleterre a introduit de nombreuses innovations tant dans le tracé que dans les types des voûtes. La croisée d'ogives a été inaugurée à la cathédrale de Durham et les voûtes à tiercerons à celle de Lincoln. L'unité des travées de la nef est recherchée depuis Durham, où les doubleaux sont placés une croisée sur deux. Ensuite, la forme longitudinale de l'espace est accentuée par la ligne faîtière.

C'est aussi en Angleterre qu'on commence à multiplier les nervures et qu'on place les liernes au sommet afin de définir une surface plane au sommet de la voûte. Ces nervures forment des étoiles, des figures centrales, ou des motifs réticulés. Les *liernes vaults*,

désignation anglaise de Willis, constituent un des types les plus caractéristiques de l'Angleterre.

La standardisation des nervures a permis de créer un autre type de voûtes *en éventail*, les *fan vaults*, caractérisées par des nervures de même courbure articulées autour de l'axe vertical des appuis. Les reins prennent alors une forme conoïde. Ce type de voûte est devenue caractéristique des voûtes anglaises.

L'innovation portait sur le tracé des nervures mais également sur l'ensemble du système constructif.

La nervure perd alors de son importance : de squelette de la voûte servant à poser les voussoirs, elle devient un élément sculpté. La voûte est recouverte par des grandes dalles pour minimiser la complexité de la multiplication des liernes qui ne sont alors plus que décoratifs.

Alors que l'Angleterre délaissait le système constructif des voûtes à nervures, l'Allemagne et les pays d'Europe centrale, accordaient un rôle plus important à la nervure, tant comme élément décoratif que – éventuellement - structurel (problématique peu abordée).

Nous y retrouvons des exemples similaires à la voûte de l'accès au chapitre du couvent du Christ à Tomar et à la voûte du transept de Jerónimos, construites sur croisée d'ogives composées, clairement dans le but d'augmenter leur portée. La voûte du réfectoire du monastère de Neuzelle est le seul exemple que nous avons trouvé d'ogive principale qui traverse trois travées, au lieu de deux habituellement.

Les nervures curvilignes, une innovation de l'Europe Centrale, peuvent également jouer un rôle structurel. À cet égard, Wendland relève la grande portée de la salle Vladislav dans le palais de Prague, ainsi que les détails constructifs de certaines voûtes, dont les nervures courbes sont incorporées à l'extrados de la maçonnerie comme élément structurel

Les aspects constructifs ne sont malheureusement pas assez étudiés, ni en Allemagne ni ailleurs en Europe. L'aspect qui est le plus relevé dans les voûtes allemandes et d'Europe centrale est leur effet décoratif, l'exubérance de leurs nervures, qui se croisent au niveau des reins, ou qui se désolidarisent de leurs appuis, qui s'élancent dans toutes les directions avec une remarquable plasticité. Cette indépendance des nervures intensifie la sensation d'un espace unique et dématérialisé.

Les bâtisseurs semblent avoir accordé plus d'importance à la forme des nervures qu'à la forme de la voûte. En effet, nous avons recherché, parmi les églises-halles, des formes de voûtes comparables à celle de la nef de Jeronimos et nous n'en avons pas trouvé. Deux voûtes présentent une surface élargie à leur sommet entre les piliers, en créant une certaine continuité entre les travées et entre les nefs : celles de l'église (*Dorfkirche*) d'Hirschfeld et celle de Laun. Le plan de cette dernière ressemble à celui de la nef de Jeronimos. Dans les zones d'intersection de la voûte, un carré se forme entre les piliers, et un octogone dans la nef centrale.

Pour notre propos, il est important de saisir que la forme d'une voûte découle directement des principes de tracé et de construction mis en

œuvre. D'après une méthode promue par les architectes savants du gothique tardif, entre le 16ème et le 18ème siècle, le tracé des nervures était peut être dérivé d'un seul arc principal, la *Principalbogen* (l'arc de la diagonale, ou le tierceron plus long quand il n'y a pas de diagonale). Cette méthode limite toutefois les possibilités de changer la forme de la voûte, qui doit suivre celle des arcs principaux. Pour cette raison, entre les travées les voûtes sont brisées.

En Espagne par contre, au début du 16ème siècle, la question de savoir si les lignes faîtières devaient être horizontales ou courbes (« à la romaine ») était un sujet de discussion entre les architectes.

Le plus souvent, les lignes faîtières des voûtes espagnoles sont courbes sur leurs axes transversaux et longitudinaux. La courbe peut être plus ou moins prononcée. Dans le tracé de Hernán Ruiz, la ligne faîtière est un arc de cercle de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan. Rodrigo Gil de Hontañón, dans sa description de la méthode de construction, décrit la cerce de la faîtière, qui est une courbe identique à celle de la diagonale ; la voûte prend alors une forme en coupole.

Il est intéressant de constater que la méthode de tracé d'Hernán Ruiz est identique à la méthode de construction de Rodrigo Gil de Hontañón. Ces deux architectes utilisent la ligne faîtière pour déterminer la hauteur des clefs et des nervures : Ruiz pour le tracé et Gil de Hontañon pour le cintrage.

Chez Rodrigo Gil, les nervures, y compris la ligne faîtière, sont standardisées et identiques. La standardisation des nervures est un trait commun à plusieurs architectes. Parfois, ce sont toutes les nervures qui sont identiques, parfois seulement les ogives et les tiercerons. Les différences d'un architecte à l'autre se retrouvent surtout au niveau de la ligne faîtière.

L'analyse des voûtes de Simon de Colonia confirme qu'il a eu une influence sur João de Castilho, tant pour le tracée du plan et élévation que pour les détails constructifs. Les plans de la chapelle Antígua de la cathédrale de Séville et de la chapelle de Salamanque montrent des similitudes avec le plan du transept du monastère de Jerónimos. La voûte présente quatre étoiles, et, à Séville, Colonia rajoute des *combados* quadrilobés en accolade, comme ceux qu'utilise Castilho. Les nervures se croisent à leur naissance au niveau des reins et la ligne faîtière est courbe en arc de cercle.

On trouve aussi des similarités entre les voûtes de Castilho et celles de Juan de Álava. Les voûtes de ce dernier réalisent une unification parfaite des travées. Celle-ci est obtenue en surbaissant les nervures, en recourant à la ligne faîtière horizontale longitudinalement ainsi qu'aux *combados* qui se prolongent entre les travées.

Par contre, toutes les voûtes de Juan Guas, dont on a parfois dit qu'elles ont influencé celles de Jerónimos, sont pourvues de lignes faîtières brisées. Guas utilise toutefois des nervures composées.

Il y a en Espagne d'autres voûtes composée de carrés ou étoiles: par exemple, la croisée de l'hôpital de los Reys Catolicos, à Saint-Jacques-de-Compostelle, et la voûte de la Lonja de Valence. Nous n'avons pas trouvé, en Espagne, d'exemples de grandes portées

couvertes par des croisées d'ogives.

La voûte espagnole la plus caractéristique est sans doute la voûte à *combados*. João de Castilho a introduit ce type de voûte à Braga, et les maîtres d'œuvre appelés *Biscaïens,* au nord du Portugal. Presque la moitié des voûtes espagnoles analysées sont des voûtes à *combados* et elles sont majoritairement localisées dans le nord du pays.

Dans l'ensemble des 213 voûtes analysées ici pour le Portugal, 73 voûtes sont attribuées à Castilho, y compris les voûtes documentées et celles pour lesquelles les opinions divergent entre les auteurs.

Pour analyser ces voûtes, nous avons crée une typologie basée sur le type de nervures : voûtes d'ogives (nervures reliant les appuis à la clef centrale), voûtes à tiercerons (nervures reliant les appuis aux clefs secondaires), voûtes à liernes (nervures reliant les clefs), voûtes à liernes courbes (*combados*), et les voûtes à nervures composées (nervure à plusieurs segments, typique du gothique tardif), terme que nous avons créé afin de conserver une terminologie qui soit basée sur le type de nervure. Ces nervures servent à créer une continuité des surfaces des voûtains en créant des voûtes en berceau ou d'autres formes continues.

Nos analyses permettent de conclure qu'il n'existe pas un type de voûte spécifique strictement prédominant qui caractériserait le Manuélin. Tous les types sont utilisés à l'époque. En termes quantitatifs, les résultats indiquent la distribution suivante : 43 voûtes à tiercerons, 30 voûtes d'ogives, 34 voûtes à liernes, 34 voûtes à *combados* et 23 voûtes à nervures composées. Les voûtes à *combados* sont en revanche spécifiques de l'époque manuéline.

João de Castilho emploie tous ces types de voûtes, y compris la croisée d'ogives (10 voûtes) de forme surbaissée ou plate, notamment au couvent du Christ à Tomar. On lui attribue 11 voûtes à tiercerons. Parmi ses 16 voûtes à liernes, la plupart forment des figures centrales, des losanges et des octogones. On retrouve ses voûtes à nervures composées (16) à Tomar (couvent du Christ et église Santa Maria do Olival) et à Jerónimos. Mais le type le plus utilisé par Castilho (21) est la voûte à *combados* (liernes courbes) formant des quadrilobes en accolade et des cercles. Dans le transept de Jerónimos, il associe *combados* et nervures composées.

Partout, la forme des voûtes nervurées est déterminée par l'élévation des arcs principaux (ogives et tiercerons) et par la forme de leurs lignes faîtières.

Il existe une évolution au niveau de l'élévation de la voûte et c'est par là qu'on peut identifier les voûtes de João de Castilho. Les voûtes portugaises plus anciennes présentent toutes des nervures en arc brisé. La grande majorité des voûtes manuélines, notamment celles de Castilho, présentent des ogives en arc de cercle et des nervures transversales et longitudinales en arc brisé. Les voûtes dont les nervures sont toutes des arcs de cercle sont plus tardives et datent de la fin du Manuélin. De cette période, on trouve également des voûtes surbaissées dont les nervures, ou seulement les ogives sont en anse de panier ; de ce premier type (nervures), plusieurs voûtes sont de João de Castilho.

Les lignes faîtières les plus courantes attribuées à João de Castilho sont courbes à la fois transversalement et longitudinalement (31 voûtes). Certaines des voûtes ont une ligne faîtière longitudinale horizontale et courbe transversalement (11 voûtes). Ces courbes sont en général des arcs de cercle parfaits.

Nous pensons que João de Castilho a pu participer à la construction de certaines voûtes manuélines non attribuées, comme dans la région d'Évora et de Portalegre. Il existe des voûtes qui ressemblent à celles de Castilho, notamment des voûtes à *combados* et des voûtes à nervures composées, types de voûtes qui lui sont caractéristiques. Nous pensons en particulier aux voûtes des deux couvents de Lóios (Évora et Arraiolos), du couvent Flor da Rosa à Crato et encore à une voûte de la cathédrale d'Évora.

João de Castilho aurait aussi travaillé au monastère de Santa Cruz de Coimbra, comme nous l'indiquons au premier chapitre. La voûte du narthex montre très clairement son intervention. Il s'agit d'une voûte à *combados* quadrilobée en accolade. Cette voûte surbaissée possède une ligne faîtière tracée par un seul arc de cercle, dans les deux axes, longitudinalement et transversalement. La continuité de toute sa surface est caractéristique de Castilho. Ces mêmes traits caractéristiques sont aussi utilisés à l'église de São João das Donas, du même monastère, dont la voûte à *combados* du chœur délimite un cercle central à surface cupulaire, ainsi qu'aux angles du cloître, comme à Jerónimos.

Certaines voûtes sont pourvues de lignes faîtières courbes sur toute leur longueur de manière à unifier les travées longitudinalement (voûtes des chœurs de l'église de Jésus de Setúbal, de l'église-matrice de Vila do Conde, de l'église d'Atalaia et de l'église-matrice de Caminha) et transversalement (cas des églises-halles).

Les résultats de notre analyse des églises-halles nous permettent de conclure que les églises-halles associées au nom de Castilho sont toutes caractérisées par leur forme en berceau. Cinq églises possèdent une ligne faîtière courbe transversale traversant les trois nefs, formule qui est apparue pour la première fois à la cathédrale de Viseu (quoique la courbe y soit encore irrégulière) et ensuite à Freixo de Espada-à-Cinta, à Arronches, à Torre de Moncorvo et à Jerónimos. La nef de l'église du couvent de Jésus à Sétubal présente deux demi-berceaux latéraux qui s'adaptent au plan existant.

Parmi les autres églises-halles analysées ici, deux se distinguent par leur ressemblance formelle : l'église Santo Antão, à Évora, attribuée à Miguel de Arruda et l'église de Luz, à Tavira, non attribuée. Les voûtes des autres églises-halles, y compris des églises contemporaines à João de Castillo, se caractérisent par leurs arcs en ogive et par leurs faîtières horizontales, ou par leurs arcs pleins, à faîtières courbes, de rayon identique à la longueur de la diagonale ou au rayon de la diagonale (forme en coupole).

Dans ces dernières églises-halles, on ne trouve toutefois aucune volonté particulière d'unifier formellement des travées. Il nous semble très probable que l'idée de créer une voûte unique définie par une courbe faîtière transversale à travers les trois nefs soit bien une innovation de João de Castillo, qui cherchait activement des solutions pour unifier l'espace des trois nefs, solution qui est sa

principale caractéristique

3. DETAILS CONSTRUCTIFS ET ANALYSES STRUCTURELLES

3.1 Introduction

Ce chapitre constitue une introduction aux détails de la construction des voûtes à nervures en pierre maçonnée (cas du monastère des Hiéronymites - Jerónimos) et en maçonnerie en briques (cas du couvent du Christ à Tomar), en préambule au chapitre suivant. On y trouvera une étude structurelle permettant d'appréhender le comportement des voûtes en berceau et le rôle des nervures.

Nous avons jugé qu'il était pertinent de présenter les résultats que nous avons obtenus lors de deux projets de conservation que nous avons coordonné : celui des voûtes de l'église du monastère de Jerónimos et celui des voûtes du cloître hospitalier du couvent du Christ de Tomar. Ces deux voûtes diffèrent entre elles, quant à leurs dimensions, leurs matériaux constitutifs et leurs détails constructifs, mais leurs nervures partagent le même système constructif et la même forme apparente en berceau.

Pour ces deux cas d'étude, nous avons réalisé des analyses de stabilité ainsi que plusieurs relevés et diagnostics sur place. Nous avons ainsi pu déterminer quelle était la constitution des voûtes et des structures grâce à un travail sur place approfondi qui a fait appel à différentes techniques d'analyse et de diagnostic.

Le projet de conservation des voûtes de l'église du monastère de Jerónimos, mis sur pied pour l'IPPAR (*Instituto Português do Património Arquitetónico*) s'est déroulé entre 1999 et 2003. Outre les données issues du projet[288] en lui-même, nous présentons des résultats de notre thèse de Maîtrise de 1995[289] ainsi que les données qui ont été recueillies cette année 2013 lors du chantier de conservation lancé par la DGPC (*Direção-Geral do Património Cultural*) et auquel nous avons pris part en tant que consultant. Nous avons publié les résultats de ce projet dans deux articles en 2008[290].

Au moment de l'élaboration du projet, nous avons pu accéder à l'extrados des voûtes, ainsi qu'à l'intrados lors de l'intervention.

Pour mener à bien le projet, nous avons pu compter sur la collaboration du LNEC (*Laboratório Nacional de Engenharia Civil*),

[288] GENIN, Soraya., *Mosteiro dos Jerónimos, Projecto de conservação e consolidação do tecto da igreja – Análise dos materiais e patologias,* rapport réalisé pour l'IPPAR en décembre 1999 (non publié); GENIN, Soraya, *Parecer sobre relatório de estudo de constituição das abóbadas da igreja através de sondagem com radar e métodos complementares, Soraya Genin*, Arquitectura e Restauro, Lda., rapport réalisé pour l'IPPAR en septembre 2002 (non publié); GENIN, Soraya., *Mosteiro dos Jerónimos, Conservação e consolidação do tecto da igreja – Relatório final*, réalisé pour l'IPPAR, Soraya Genin – Arquitectura e Restauro, Lda. rapport réalisé pour l'IPPAR en décembre 2003 (non publié).

[289] MONTEIRO, Soraya, *Étude descriptive de la voûte de l'église du monastère de Santa Maria de Belém à Lisbonne*. Thèse de maîtrise (non publié) Katholieke Universiteit Leuven, 1995.

[290] GENIN, Soraya, "Projecto de consolidação do tecto da igreja do Mosteiro dos Jerónimos – Estudos preliminares", *in 3º Encore – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*, LNEC, 2003, pp. 653-671 ; OLIVEIRA, Marília, MUN, Mary, GENIN, Soraya, "Prospecção por radar sobre as abóbadas da igreja do mosteiro dos Jerónimos"*, in 3ºEncore – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios,* LNEC, 2003, pp. 327-354.

afin de réaliser des sondages des colonnes par ultra-sons (chapitre 3.2.8, données de notre maîtrise)[291], des sondages des voûtes au Géo Radar et par d'autres techniques de diagnostic non destructives, et d'analyser en laboratoire les matériaux de l'extrados (chapitre 3.2.2)[292]. Le département de génie civil de l'Université du Minho a assuré l'étude de stabilité par la méthode des éléments finis (chapitre 3.2.11)[293].

Le projet de conservation des voûtes du cloître hospitalier du couvent du Christ de Tomar a été élaboré en 2004 dans le cadre d'un appel d'offres restreint lancé par l'IPPAR-*Instituto Português do Património Arquitectónico*. Nous présentons la synthèse du projet de conservation, achevé en 2006 [294] et repris dans notre article publié en 2008.[295] L'analyse structurelle a été menée sur base de deux études complémentaires. La première portait sur l'analyse géométrique des déformations de la voûte et a été confiée à l'architecte Karel Breda (chapitre 3.2.4)[296]. La seconde a recouru à un programme d'analyse non linéaire, sous la responsabilité de l'ingénieur Paulo Lourenço (chapitre 3.2.5)[297].

Nous joignons une partie des résultats les plus pertinents pour la présente étude, notamment ceux qui sont relatifs aux détails constructifs et au comportement structurel des voûtes et à l'influence des nervures.

3.2 Église du monastère de Jerónimos : voûtes de la nef et du transept

3.2.1 *Données d'archives*

L'église Santa Maria de Belém du monastère de Jerónimos a fait

[291] Rapport *Essais avec des ultrasons dans les colonnes de l'église du monastère de Jerónimos,* réalisé par le département de barrages du « Laboratório Nacional de Engenharia Civil (L. N. E. C.)», de Lisbonne en octobre 1994 (rapport non publié).
[292] MUN, Mary. – *Estudo da constituição das abóbadas da igreja do mosteiro dos Jerónimos através de sondagem com radar e métodos complementares de diagnóstico,* Relatório nº 176/2002, LNEC, Julho 2002 (rapport non publié); OLIVEIRA, Marília.M.P. - *Prospecção por radar na igreja do mosteiro dos Jerónimos*, Relatório nº 177/2002 – NP, LNEC, Novembro 2002 (rapport non publié).
[293] LOURENÇO, Paulo B., KRAKOWIAK, Konrad J. – *Avaliação da estabilidade da igreja do mosteiro dos Jerónimos*, Relatório 03-DEC/E-02, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Maio 2003 (rapport non publié).
[294] GENIN, Soraya, *Convento de Cristo, Tomar – Estudo de Patologias e Estabilidade, e Projecto de Consolidação das Abóbadas do Claustro da Hospedaria e Salas Adjacentes, Soraya Genin*, Arquitectura e Restauro, Lda. 2006 (rapport non publié).
[295] GENIN, S., DE JONGE, K., VAN BALEN, K., "Projecto de Conservação das Abóbadas do Claustro da Hospedaria do Convento de Cristo, em Tomar", *Actas do 4º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas* (publication informatique), Universidade de Aveiro, 2008.
[296] BREDA, K.: *Onderzoek van de gewelven van het Convento de Cristo, Claustro da Hospedaria*, Tomar, Portugal, Karel Breda, Architectuurbureau, rapport réalisé pour l'IPPAR en décembre 2004 (non publié).
[297] LOURENÇO, P.B., *Parecer sobre a Estabilidade das Abóbadas do Claustro da Hospedaria (1º piso, alas sul e este) e antiga sala da Morgue do Convento de Cristo, Tomar*, Gabinete de Projectos Barbosa Lourenço, Lda., rapport réalisé pour l'IPPAR en 2004 (non publié).

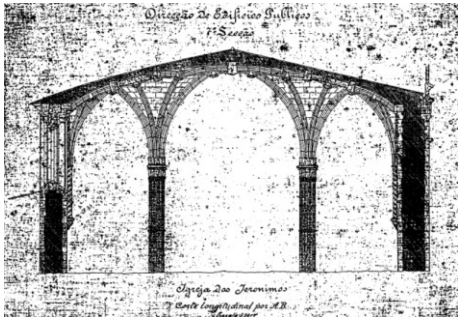
l'objet de deux campagnes de travaux lancés par la DGEMN (*Direcção Geral dos Edificios e Monumentos Nacionais*) de Lisbonne : la première, entre 1927 et 1931, pour la restauration des voûtes, et la seconde en 1947-1949 pour la rénovation de la couverture. Les dossiers des travaux fournissent des informations précieuses, notamment sur les voûtes de la nef et du transept.

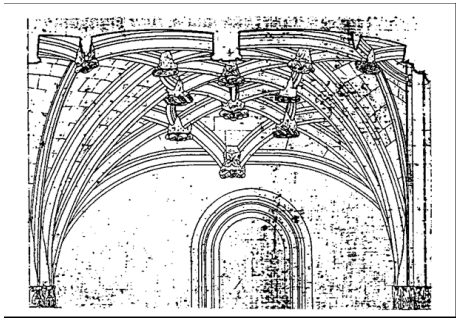
Nous avons mené une recherche approfondie destinée à retrouver des documents. La lecture des dossiers, plus ou moins bien détaillés, des travaux effectués est extrêmement instructive, notamment grâce aux dessins et aux photos qui ont été réalisés lors de ces travaux. Si les documents graphiques (Figure 108).font preuve d'une certaine rigueur, notamment dans la représentation des nervures, l'appareillage des voûtains a cependant été oublié. On y évoque le remplacement de pierres du voûtain et de crampons en fer par des crampons en bronze. Nous avons trouvé deux photos de détails dont l'une indique la présence de crampons en fer entre les nervures et l'autre donne détail du transept (Figure 109) Une lettre de l'architecte responsable des travaux de restauration, Adães Bermudas, publiée dans un journal de juillet 1920, annonçait des études préparatoires et faisait le point sur l'état des voûtes et sur les causes de dégradation « (...) des symptômes de rupture qui commencent à apparaître dans les voûtes, surtout dans la nef latérale gauche (...), à cause d'une infiltration continue des eaux de pluie qui, après avoir attaqué les pierres et élargi les joints, attaquent ces derniers temps, avec une intensité impressionnante, les crampons qui relient les claveaux des nervures, les oxydant rapidement et faisant éclater les nervures sous l'action du gonflement causé par la rouille. Or, ces nervures (...) supportent et redistribuent toutes les charges dans une combinaison de formes et d'équilibre des forces vraiment géniaux, [et] si la réduction des profils que l'on voit devait se poursuivre (...), cela pourrait provoquer des écroulements partiels, dont la répercussion et la portée pourraient probablement être dangereuse (...) ».

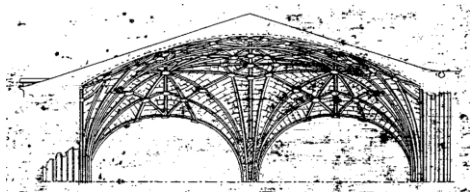
Un mémo[298] datant de 1927 décrit les travaux : « Les travaux de consolidation des voûtes des nefs de cette église ont été achevés et il manque encore la phase de la voûte du chœur et de la croisée [= du transept] ; (…) On poursuit donc le plan de réparations qui a été suivi jusqu'à aujourd'hui (...) il faut encore réaliser les travaux suivants (...) remplacer ou réparer toutes les nervures ou les voussoirs qui en auraient besoin de par leur état de ruine, les réparer ou leur mettre des cales, refermer les joints des nervures et des voussoirs, étayer convenablement les arcs pour pouvoir y faire des nouvelles pièces, et remplacer par des crampons en bronze les crampons en fer dont l'oxydation a abîmé certaines pierres de la voûte. Pour effectuer ces travaux, il faudra démonter la toiture et démolir la maçonnerie à l'endroit des nervures à remplacer. (...) Outre la pierre de taille, il faudra aussi recourir à d'autres matériaux, tels que le plomb et ciment pour refermer les joints et aussi à des crampons de bronze ».

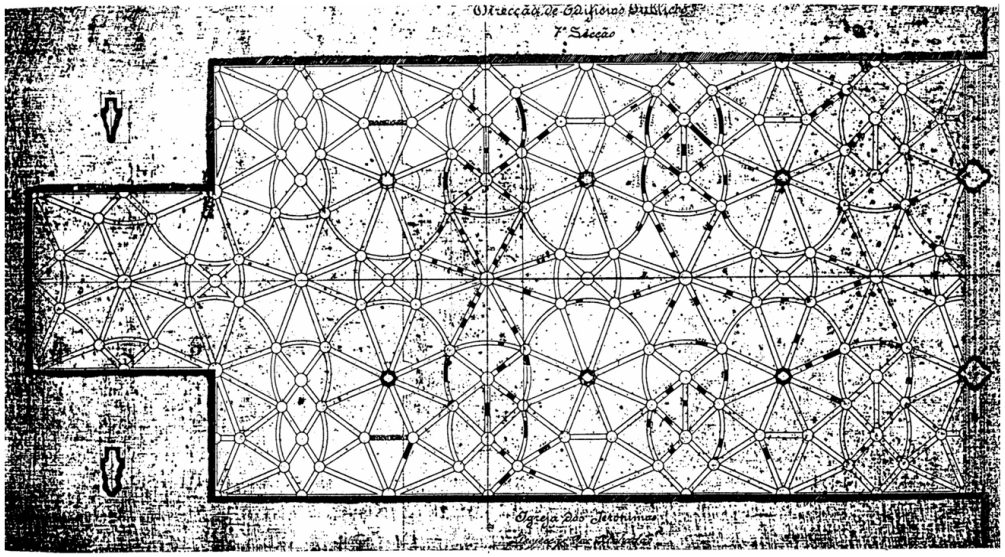
Le métré des travaux du transept prévoyait ce qui suit : retirer et

[298] www.monumentos.pt, *Obras urgentes de reparação nos telhados e abóbadas da igreja e claustro dos Jerónimos*, daté du 18 juillet 1927.









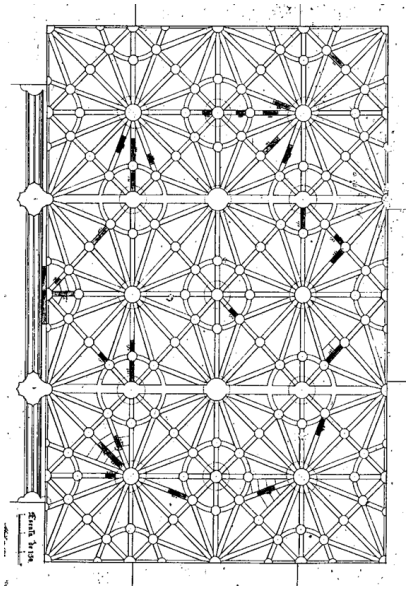


Figure 108. Plans des travaux de restauration de 1927-31.
Voûtes de la nef et du transept de l'église du monastère de Jerónimos. (IHRU)

refaire la toiture et le revêtement en maçonnerie de la voûte (80m^2) ; refaire les joints des pierres des voûtains et des nervures de la voûte (600m^2) ; tailler des pierres de réparation (80 pièces) et pratiquer des coupes pour placer celles-ci ; tailler des pierres courbes de nervures à moulure avec des décrochements pour les pierres des voûtains, et les placer (40 ml) ; pose de crampons en bronze remplaçant les crampons de fer (800 pièces) ; autres matériaux pour ces travaux : ciment, plomb et autres.

Selon un article du journal *Ecos de Belém*, les travaux auraient été achevés en 1931. Quelques années plus tard, la reconstruction du toit commençait : en juillet de 1947, les combles du transept sont démolis et des rangs de briques destinés à soutenir les tuiles sont construits sur la voûte ; en 1949, on procède à la construction de la couverture de la nef en suivant ce qui avait déjà été fait sur le transept (...).

Nous avons pu voir vu cette structure en briques destinée au remontage du toit. Il nous reste encore quelques importantes photos d'époque du transept qui montrent comment se présentait la couverture précédente (Figure 110.). On y voit notamment que les pannes et les chevrons de la couverture en tuile étaient soutenus par des pieux debout dressés directement sur l'extrados d e la voûte. Ces photos montraient qu'il existait une masse très importante de débris, apparemment des débris de terre cuite, amassée sans ordre jusqu'à mi-hauteur des pieux.

En 1963, d'autres travaux ont été réalisés pour refermer les joints, qui ont pris fin en deux mois. Nous n'avons trouvé aucune autre référence de travaux de restauration des voûtes de l'église.

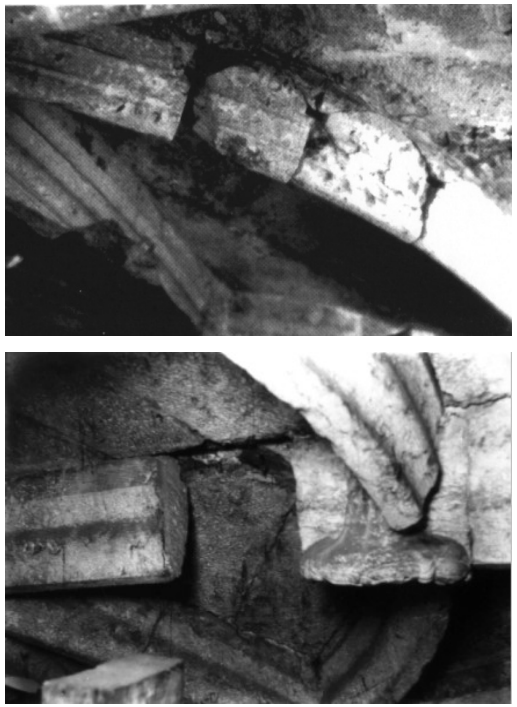


Figure 109. Photos de détails des nervures.
En haut la photo indique la présence de crampons en fer entre les nervures et en bas un détail du transept. 1927-1931. (IRHU)

De nos jours encore, plusieurs rapports font état de chutes de fragments de pierre. Nous avons nous-mêmes été confrontés à la matérialité de ce problème pendant nos travaux sur place. Quelles en



Figure 110. Photo de la toiture du transept. 1927-31. (IRHU)

sont les causes ? Plusieurs raisons ont été avancées : dégâts dus aux infiltrations, vieillissement des mortiers, pierre de mauvaise qualité, ou crampons de fer ayant subsisté et qui continuent à rouiller. Tout cela figure dans ces documents d'archives. L'oxydation est très certainement la cause principale et elle doit faire l'objet d'un diagnostic, précisément à cause du nombre important de crampons et au problème que ceux-ci peuvent constituer en présence d'humidité pluviale ou de condensation.

Nous ignorons si les crampons de fer de la voûte sont originaux ou s'ils datent d'une ancienne restauration antérieure aux années 1930. La problématique de l'utilisation de crampons de fer dans la construction des voûtes est pertinente et elle a été abordée par certains auteurs.

Mainstone indique que les crampons étaient utilisés dans la construction des voûtes par les bâtisseurs romains, byzantins et gothiques, qui les utilisaient pour unir des blocs voisins et ils étaient normalement en fer et en forme de T double ou de U allongé.[299]

Montclos note que les voûtes plates doivent être faites en douelles munies de crampons métalliques.[300]

Les crampons peuvent également provenir d'interventions de restauration, comme on le voit par exemple à la chapelle du *King's College*, dont les crampons de fer de la voûte furent posés au 19ème siècle lors d'une restauration.[301]

B. Mouton donne deux autres exemples de voûte à crampons : l'église Saint-Sulpice, à Paris, où les crampons ont été disposés à la base du tambour de la coupole, reliant les pierres pour créer une ceinture homogène ; et la coupole du Panthéon de Paris, dont un ancien plan et des photographies montrent la position des crampons, visible à l'intrados.[302]

[299] MAINSTONE, R., *Developments in Structural Form, Cambridge,* Mass., 1975, p.52

[300] MONTCLOS, *Jean Marie de, L'Architecture à la Française, XVIème, XVIIème, XVIIIème siècles*, Picard, Paris, 1982, p. 173

[301] LEEDY, Walter C. Jr., *Fan vaulting: A study of form, technology, and meaning*. Scolar Press, AATA n. 19-1178, London. 1980.

[302] B. MOUTON, « Méthodes d'analyse destructives et non-destructives pour les structures historiques. Avantages et limites », in *Lemaire R. M. et Van Balen K. (ed), Stable – Unstable?,* Louvain, 1988, pp 141-155

3.2.2 *Données des sondages à l'extrados*

Les tuiles de l'église de Belém ont été partiellement retirées afin de permettre d'accéder par l'extrados à un module de la nef et à des rangées représentatives du transept. La Figure 111 représente les zones inspectées de la nef et du transept. Des plans reprenant la superposition de l'intrados et de l'extrados ont servi de base aux diagnostics.

Une fois les tuiles enlevées, nous avons fait procéder à des essais non destructifs sur les matériaux constituant le recouvrement des voûtes, par sondage radar et au détecteur de métal, ainsi qu'à des analyses de matériaux en laboratoire. L'analyse a été complétée par des sondages directs visant à déterminer l'épaisseur du matériau du revêtement ainsi que par tests endoscopiques (Figure 112). Les sondages par forage n'ont porté que sur le matériau du remplissage.

Un modèle tridimensionnel de la nef et du transept a été réalisé complété par des plans et des profils définissant les épaisseurs de la voûte.

Les données obtenues par Géo Radar sont assez rigoureuses. Les résultats de la prospection au radar et ceux du relevé topographique sont quasiment coïncidents. L'équipement utilisé a été le « Geophysical Survey Systems, Inc. » (GSSI), modèle SIR10 et des antennes d'émission – réception d'énergie électromagnétique à fréquence centrale de 500 et 900 MHz, les meilleurs résultats ayant été obtenus à 900MHz. La technique par Géo Radar repose sur la propagation des ondes magnétiques. Elle permet d'identifier les différentes strates de matériaux distincts, en conductivité électrique et en permissivité électrique, par réflexion d'énergie électromagnétique sur les interfaces entre les différents matériaux. La Figure 113 montre l'image obtenue et les différents niveaux de l'intrados et de l'extrados de la voûte. La Figure 114 montre un résumé des sondages. Nous nous basons sur ces résultats pour détailler la coupe transversale nº 7 dans la zone dont les tuiles ont été retirées. La coupe représente les trois couches de matériaux distincts qui ont été détectés : à l'intrados, les voussoirs, ensuite le remplissage des reins et à l'extrados, la maçonnerie qui recouvre toute la voûte. Résumons les résultats obtenus par sondage :

- Dans le transept, trois épaisseurs totales de voûte ont été détectées. Elles variant entre 0,16 et 0,24m.
- Dans la nef, l'épaisseur totale minimale détectée a été de 0,14m ; l'épaisseur des voussoirs est comprise entre 0,08 et 0,10m, soit une moyenne de 0,09m,;
- Au-dessus des piliers, sous le niveau de l'extrados, on a détecté une première couche de recouvrement de 0,35 à 0,40m délimitée par une zone de réflexion probablement constituée du matériau de remplissage des reins ;
- Le revêtement est en pierre calcaire constituée d'un agrégat rougeâtre du type conglomérat d'arénite riche en oxyde de fer. Le liant est un mortier à la chaux aérienne composé (à environ 1:1) de sable de rivière de nature siliceuse et de débris de coquillage;
- Les crampons métalliques n'ont pas pu être détectés.

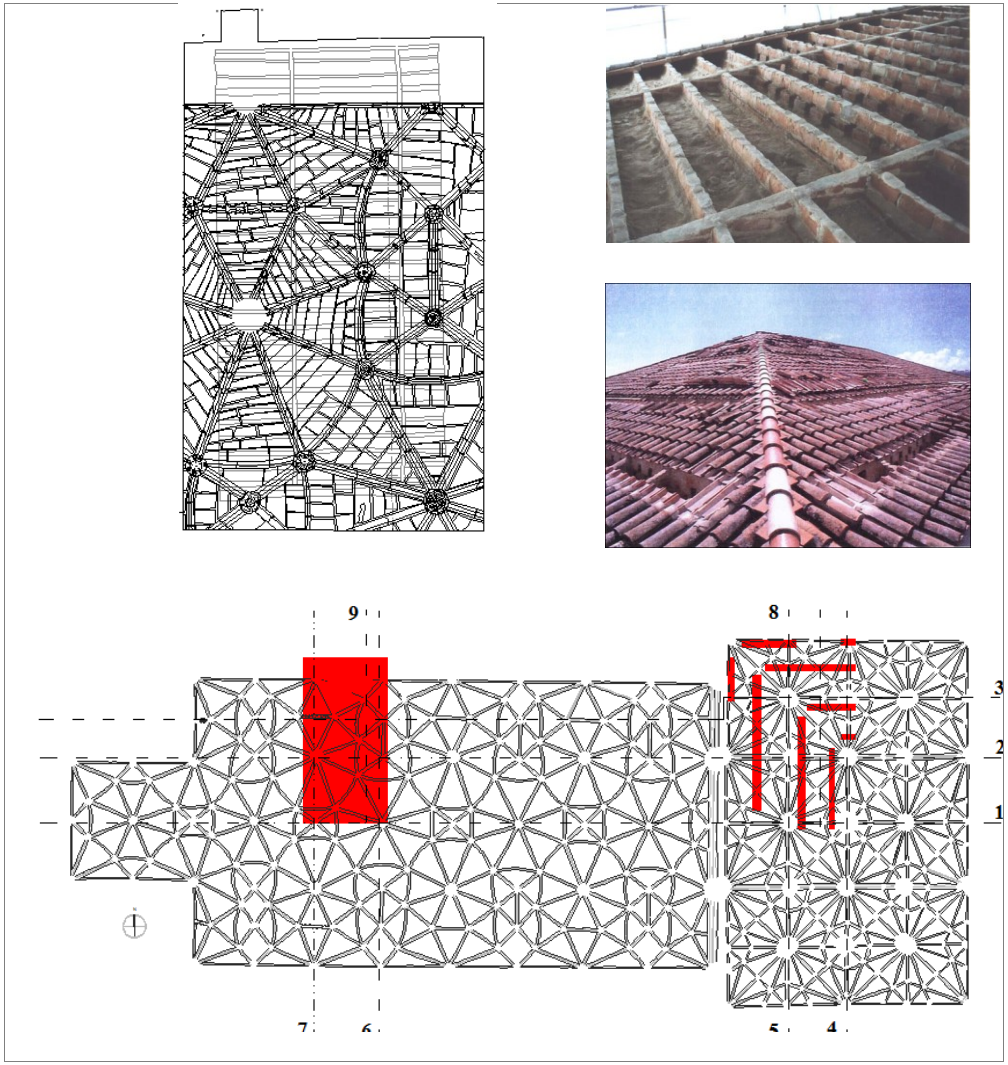


Figure 111. Sondages à l'extrados des voûtes de la nef et du transept. Plans de l'extrados et de l'intrados d'un module de la nef (en haut) et représentation des zones inspectées de la nef et du transept (en bas). Photos de l'extrados de la nef (en haut) et du transept (en bas). (Genin, 2002)



Figure 112. Sondages directs visant à déterminer l'épaisseur du matériau du revêtement ainsi que des tests endoscopiques.
(Genin, 2002)

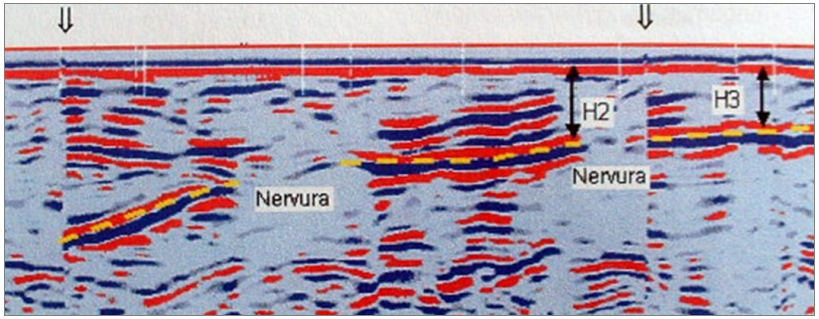


Figure 113. Données obtenues des sondages par Géo Radar.
Image des différents niveaux de l'intrados et de l'extrados de la voûte.
(Mun, 2002)

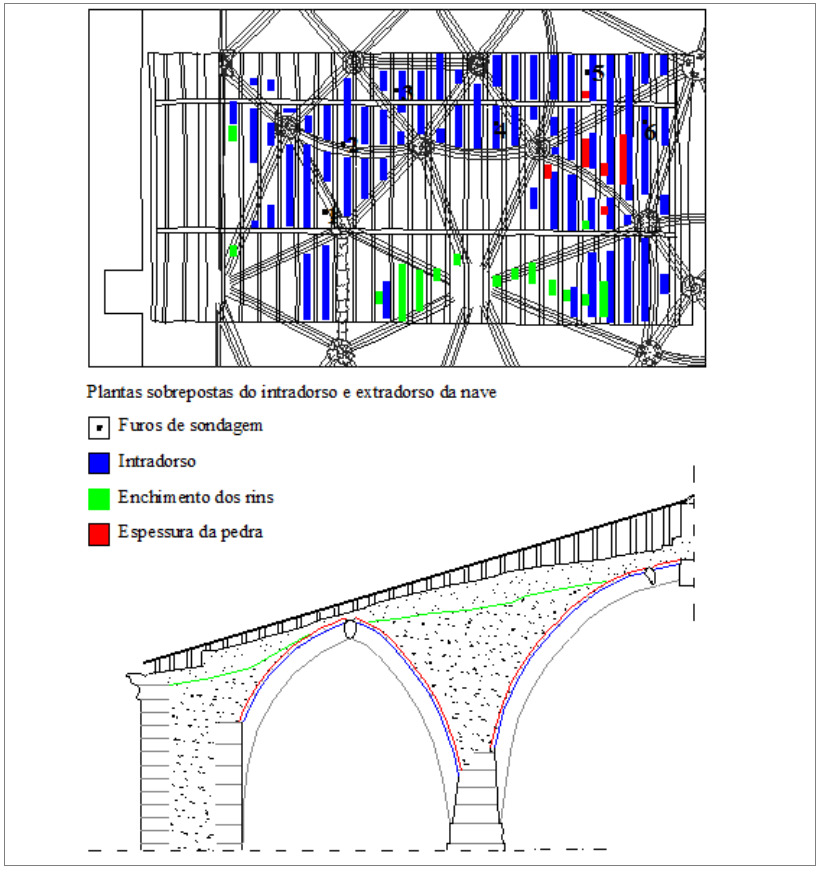


Figure 114. Résumé des sondages en plan et en section. (Genin, 2002)
En bleu l'intrados, en rouge l'épaisseur des voûtains, en vert le niveau de remplissage des reins. Le plan localise les données obtenues par Géo-Radar.

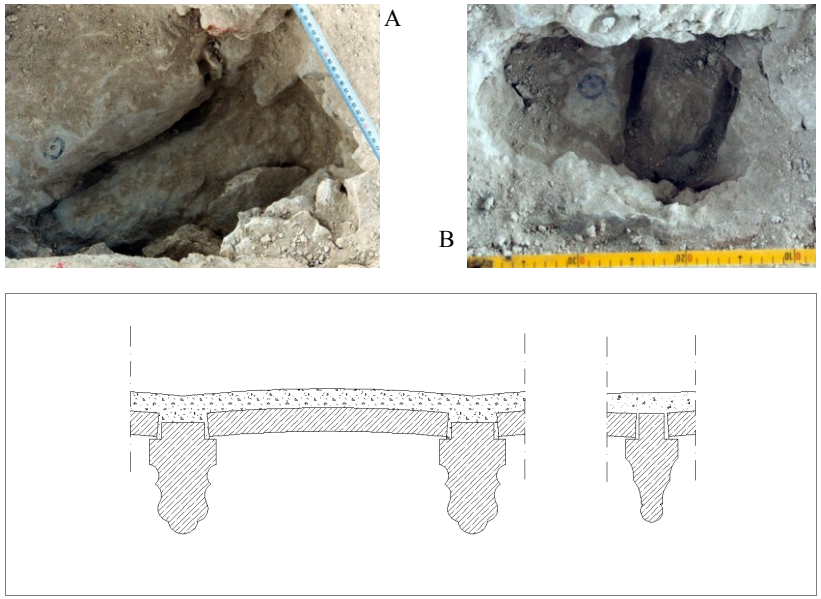


Figure 115. Deux saignées d'inspection à l'extrados. (Genin, 2002)
A - la nervure droite en plan B - le *combado.*

Figure 116. Section de la voûte. (Genin, 2002)
Nervure droite (gauche) et combado (droite).

Deux saignées d'inspection ont été ouvertes (1 et 2). On observe qu'à l'extrados, le *combado* (Figure 115B) est sur le même plan que le voussoir. Son queutage est en effet plus saillant et il est plus fermement intégré aux voussoirs que celui de la nervure droite en plan (Figure 115 A). L'épaisseur de la pierre des voûtains dans la saignée 1 est de 10 cm. La Figure 116 montre une coupe en détail de la voûte (nervures, voûtain et recouvrement).

Sur toute la longueur de la nef, on remarque une excroissance en maçonnerie apparemment d'origine, qui semble faire corps avec le reste de l'extrados et qui s'apparente à une ligne faîtière qui pourrait être un renfort longitudinal disposé sur la voûte.

Les résultats que nous avons trouvés révèlent une structure courante pour les voûtes du gothique final. Les nervures présentent des queutages saillants qui aident à la pose des voussoirs. À l'époque, les voûtains étaient devenus très fins, jusqu'à 7-8cm d'épaisseur, réduisant le poids sur les plus grande portées. Le remplissage des reins ainsi que la surcharge des points d'appui soumis à des poussées importantes est une technique gothique qui vise à assurer la stabilité en réorientant verticalement les poussées obliques. Le remplissage était aussi un moyen de contrer la tendance au soulèvement des arcs brisés tout en assurant la stabilité. Le blocage qui recouvre la voûte liait le tout et créait une surface homogène à l'extrados[303].

3.2.3 *Plan et élévation*

Les bâtisseurs gothiques n'effectuaient pas de calcul structurel. Pour créer les formes qu'ils recherchaient, ils recouraient à la géométrie.

[303] FITCHEN, John, The Construction of Gothic Cathedrals: A Study of Medieval Vault Erection, The Clarendon Press, Oxford, 1961, pp. 83-85.

L'importance de la géométrie est telle que des bâtiments différents construits selon une même géométrie présentent des comportements structurels similaires. C'est ainsi que la reproduction d'une forme déjà connue constituait une garantie de stabilité. Nous confirmerons ce point pour la voûte de la nef.

L'innovation structurelle des deux voûtes (nef et transept) de l'église du monastère de Jerónimos réside dans les formes uniques qui recouvrent ces deux espaces de grande portée.

Nous nous pencherons plus en détail sur la forme des voûtes au chapitre suivant. Examinons pour l'instant la géométrie d'ensemble et les proportions de l'église, éléments qui sont nécessaires pour comprendre la structure. Nous nous attacherons particulièrement à la voûte en berceau de la nef.

Sur son plan de 51,00m sur 22,40m, la voûte de la nef se déploie sur cinq travées. La nef centrale, d'une largeur de 10,20m, est séparée des nefs par deux rangées de piliers. La hauteur de la voûte est de 24,00m dans la nef et de 23,20m dans les bas-côtés, soit une différence de 80 cm à peine. Les colonnes culminent à 17,00m et leur section octogonale est inscrite dans un cercle d'un diamètre de 1,00m. Du côté sud, l'épaisseur du mur est de 1,90m, à laquelle s'ajoute 1,60m pour les contreforts. On remarque que deux de ceux-ci ne sont pas dans l'alignement des colonnes. Le mur nord contient un escalier qui donne accès à l'étage du cloître. D'une épaisseur totale moyenne de 4,30m (escalier compris), ce mur épais contrebute d'autant plus efficacement la voûte de la nef qu'il est adossé au flanc sud du cloître.

Quant au transept, il est recouvert d'une voûte qui culmine à 26,75m reposant sur des murs d'une épaisseur de 2,50m et sur les deux larges piliers de la croisée, d'un diamètre de 2,20m, qui le séparent de la nef. À l'extérieur, au-dessus des murs latéraux du chœur, on trouve deux contreforts posés dans l'axe des colonnes à un angle 45º dans l'alignement des ogives principales de la voûte. Il s'agit d'un détail très important pour comprendre la structure de cette voûte du transept en particulier et des voûtes réticulées en général, comme nous le verrons plus loin au point 4.1.5 Tas de charge.

Nous avions étudié la géométrie de la voûte de la nef d'après les dessins d'archives et les relevés pour notre maîtrise. Nous y ajoutons l'analyse du transept, en particulier le rapport géométrique entre les deux voûtes. La Figure 117 présente le plan et élévation de la nef et du transept de l'église Santa Maria de Belém et l'analyse de la géométrie. La Figure 118 présente l'analyse géométrique de la voûte de la nef.

- Dans la nef, les hauteurs de clefs définissent deux axes de symétrie de la voûte : un axe longitudinal dans la nef centrale aligné sur la hauteur des clefs, et l'axe transversal de chaque travée, dont les clefs s'abaissent progressivement en se rapprochant des consoles des murs ;
- Les travées de la nef centrale forment des carrés, et celles des nefs latérales forment des rectangles dont les diagonales à 60° définissent des triangles équilatéraux ;
- Si nous traçons des demi-cercles sur les diagonales des travées des

nefs centrales et latérales, nous trouvons la hauteur des clefs centrales, ce qui correspond au tracé traditionnel des voûtes gothiques. Les centres des arcs diagonaux sont à la hauteur des chapiteaux. L'arc qui passe par les trois clefs centrales des trois travées constitue le tracé général de la voûte, étant donné que trois points suffisent pour définir un arc.

- À partir de cette courbe principale de la ligne faîtière (f), nous pouvons déterminer son centre, qui est plus bas que le sol. Son diamètre est égal à l'écartement des murs extérieurs des chapelles du transept, ce qui correspond approximativement à la longueur de la nef. Nous trouvons aussi un autre arc de cercle qui coïncide avec la hauteur des clefs, qui est centré au niveau du sol et dont le rayon correspond à la longueur de la diagonale du corps principal de l'église (Figure 117). N'importe lequel des deux arcs a pu être utilisé pour le tracé général de la nef.
- En élévation, nous retrouvons les mêmes proportions qu'en plan : un carré central entre les axes des colonnes, et des rectangles à diagonale à 60º disposés autour de ce carré, entre les murs, la base des colonnes et la clef centrale. Nous trouvons un plus grand carré délimité par les murs, la base des colonnes et la clef centrale. La hauteur de la nef est presque égale à sa largeur.
- Dans la voûte du transept, les rapports entre le plan et l'élévation de la voûte sont organisés comme suit : le carré inscrit dans l'élévation est divisé selon la même trame que celle du plan des nervures. Le premier arc de cercle que nous avons trouvé pour la nef sert à tracer la ligne faîtière longitudinale de la voûte du transept. Son centre est au niveau du sol et son rayon correspond à la longueur d'une ogive principale (en bleu sur le plan du transept).

Si nous comparons ces éléments avec les règles d'alors, nous remarquons que la voûte de la nef, malgré sa forme en berceau, respecte les proportions et les formules en usage à l'époque pour dimensionner les structures.

Les proportions sont aussi celles de plusieurs églises du gothique final.

Dans la proportion d'ensemble de l'église, la hauteur est égale à la largeur. Les hauteurs des clefs centrales de la voûte en berceau correspondent aux longueurs des demi-diagonales en plan, comme dans une voûte en croisée d'ogives.

L'épaisseur des murs du transept respecte la formule Portée/10 utilisée à l'époque pour le dimensionnement des murs[304], l'épaisseur des murs est de 2,50m et la portée 19,00m. Cependant, le mur de la nef présente une épaisseur de 1,90m, au lieu des 2,24m si la règle avait été respectée en considérant la largeur totale de l'église de 22,40m.

[304] HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "Technical challenges in the construction of gothic vaults: The gothic thoery of structural design" in: *Construction Techniques in the Age of Historicism. From Theories of Gothic Structures to Building Sites in the 19th Century*, U. Hassler, Ch. Rauhut y S. Huerta, eds. München: Hirmer, 2012, pp. 175-176.

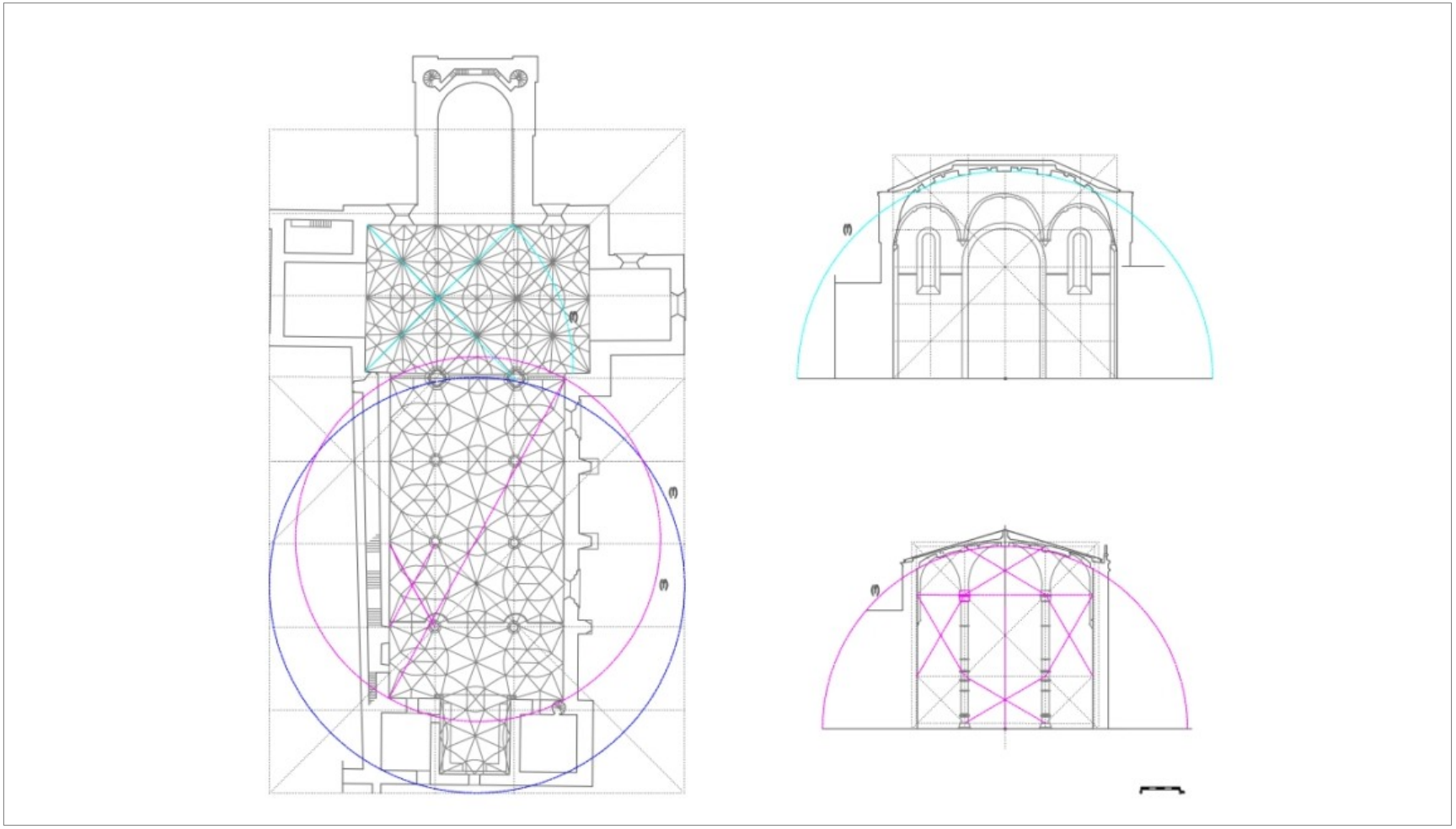


Figure 117. Plan et élévation de la nef et du transept de l'église Santa Maria de Belém (Jerónimos) et analyse de la géométrie.

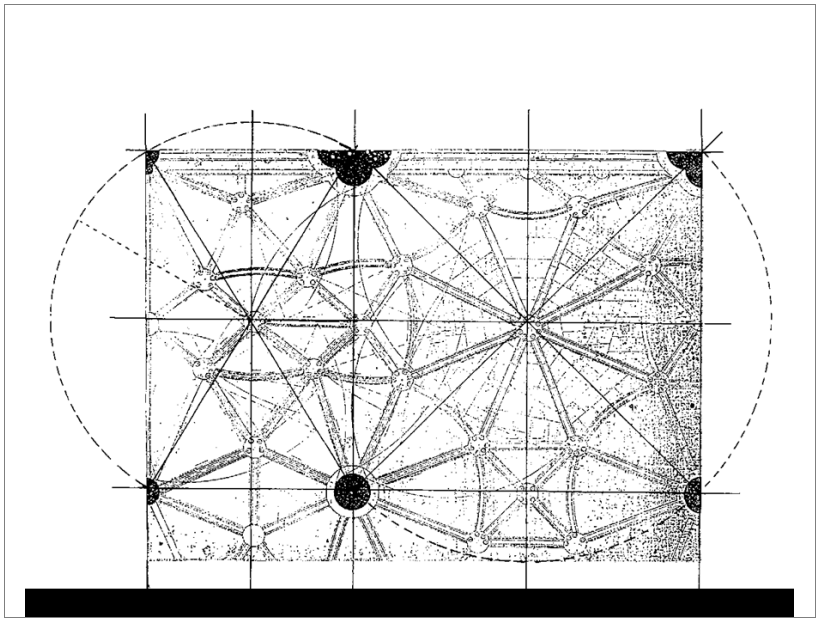


Figure 118. Analyse géométrique de la voûte de la nef.
Le plan représente une travée latérale et centrale.
Des demi-cercles sur les diagonales donnent la hauteur des clefs centrales.
(Monteiro-Genin, 1995)

3.2.4 *Les nervures*

Quand on observe le modèle en 3D de ces deux voûtes (Figure 119), il est de prime abord malaisé de distinguer les nervures principales dans le foisonnement des triangles. Ce n'est que dans le transept qu'on distingue les deux arcs doubleaux, de proportions plus importantes que les autres nervures.

1- Dans la nef, les tiercerons et les liernes sont d'épaisseurs identiques (0,40m x 0,30m). Ces nervures principales de mêmes dimensions sont recoupées par des *combados* de moindre épaisseur. Les nervures courbes en plan sont plus petites (0,35m x 0,22m) (Figure 118). Nous avons obtenu leurs dimensions et leurs profils à travers des plans d'archives et nous les avons ensuite confirmés sur place.

Les nervures droites assurent la liaison entre les appuis, en évitant tout parallélisme aux axes. Les arcs traditionnels sont remplacés par des paires de triangles qui se contrebutent qui produisent des formes en étoile. Entre les points d'appui, on trouve une croisée de liernes intercalée entre les tiercerons. Tiercerons et liernes sont de mêmes dimensions et profils. Les traditionnels arcs doubleaux et formerets ne sont plus visibles en tant que tels mais ils ont été remplacés par des combinaisons de triangles adossés en losanges. (Figure 120).

Les nervures curvilignes forment des figures géométriques dans la voûte : octogones, carrés, losanges, autant de formes qui suivent la forme du berceau. Elles définissent des lignes d'intersection entre la forme de la voûte en berceau et les reins (Figure 121).

2 – Dans le transept, seuls les deux arcs doubleaux, d'une section plus grande de 0,60m sur 0,48m, se détachent plus clairement des autres nervures ; les ogives, les tiercerons et les liernes faîtières présentent un même profil de 0,38m sur 0,28m. Les liernes font 0,32m sur 0,24m et les *combados* 0,23m sur 0,18m (Annexe PT-A46). La profusion des nervures et leur disposition confèrent une grande unité visuelle à la voûte.

Un examen plus attentif du plan du transept confirme le rapport étroit qui unit les deux voûtes. On retrouve les mêmes carrés et les mêmes formes en étoile dans les travées centrales de la nef et dans le transept. Le carré qu'on retrouve entre chaque paire de piliers de la nef centrale se transforme en demi-cercle au raccord avec le transept, pour parfaire la liaison avec lui. (Figure 122). En élévation, les deux arcs qui séparent la nef et le transept présentent également un raccord parfait, ce qui suggère, selon nous, l'existence d'un seul projet.

Les arcs principaux sont les doubleaux, et les arcs d'ogives à 45º, parallèles entre eux, qui forment six croisées d'ogives.

Des liernes relient les clefs principales des six croisées et forment un rectangle central sur les lignes faîtières secondaires. Les liernes forment aussi des losanges au centre de chaque croisée.

Les *combados* disposés en cercle sont placés le long de ces lignes faîtières secondaires et relient les losanges de chaque croisée d'ogives.

Toutes les nervures sont placées en position verticale, sauf les

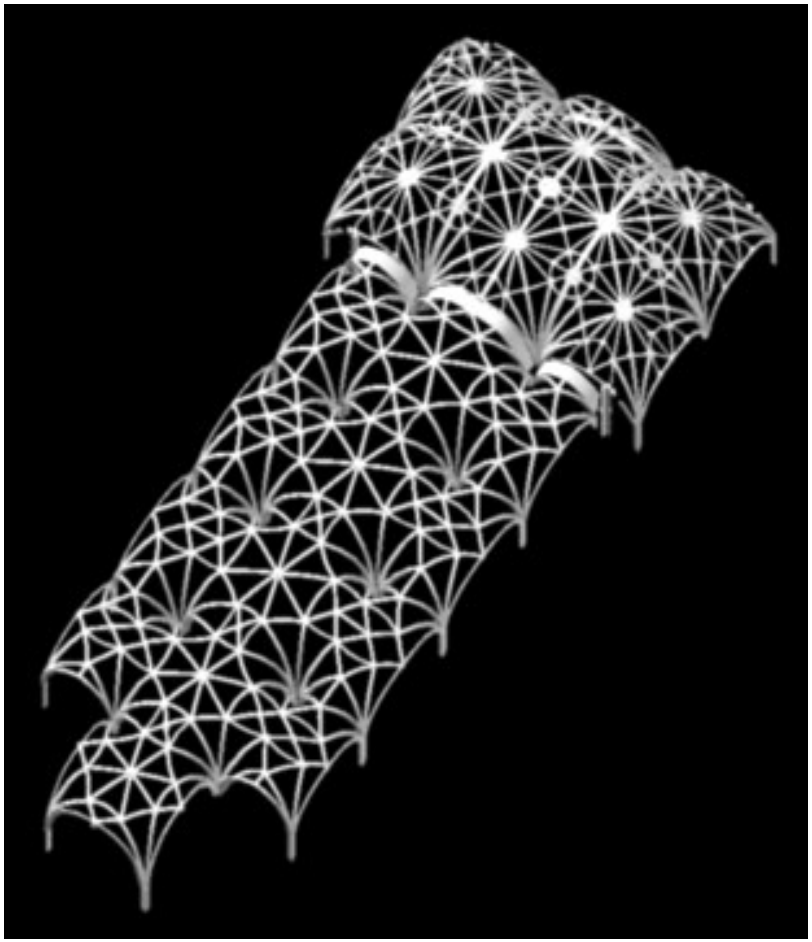


Figure 119. Modèle en 3D des voûtes de la nef et du transept.
(Genin, 2002, dessin d'Arqmor)

combados, qui sont perpendiculaires à la voûte. Tant dans le cas de la nef que du transept, les *combados* ont été placés dans les zones les plus fragiles de la voûte, à la rencontre les différents plans des voûtes. Dans le transept, on distingue plus difficilement les zones d'intersection des plans, la forme de la voûte y étant plus homogène. L'altération des plans se produit le long des lignes faîtières qui relient les six croisées, comme on le verra plus en détail au chapitre suivant.

3 – Le rôle structurel des nervures est un habituel point de discussion.

Nous l'avons vu au chapitre précédant, les nervures étaient dimensionnées à l'époque. Unterweisungen traçait les nervures par rapport à l'épaisseur des murs. Rodrigo Gil de Hontañón dimensionnait les épaisseurs en fonction de la portée. On reconnaît dans les calculs de Rodrigo Gil, un moyen de calculer la structure[305]. Ses indications pour la voûte en coupole sont les suivantes : les nervures transversales doivent être les plus épaisses, ensuite les ogives et tiercerons, de même section, et enfin, les formerets sur les murs.

En appliquant ces règles de dimensionnement des nervures, l'épaisseur de 0,40m des tiercerons de la nef respecte la formule Portée/28 indiquée par Rodrigo Gil (10,20m/28=0,36). Pour la voûte du transept, nous trouvons des valeurs inférieures à celles attendues en utilisant les formules de Rodrigo Gil et celles d'Unterweisungen.

Le système de triangles se contrebutant est le trait le plus caractéristique de la structure de la nef. On repense au commentaire de Viollet-le-Duc à propos de la liberté de la création des bâtisseurs de voûtes de la fin du gothique : « Quelle que soit la figure en plan de la surface à couvrir, le problème à résoudre est toujours celui-ci : 1°) faire en sorte que cette surface soit divisée par les arcs diagonaux de manière à présenter une suite de triangles, car, avec ce système de voûte, on ne peut couvrir que des triangles ; 2°) disposer les arcs diagonaux ou ogives de telle façon que ces arcs se contrebutent à leur sommet, et que l'un d'eux ou plusieurs d'entre eux réunis ne puissent presser sur les autres de manière à les déformer » [306].

La multiplication des triangles définit la forme en berceau qui est normalement obtenue par translation de l'arc doubleau.

[305] HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "The medieval 'scientia' of structures: the rules of Rodrigo Gil de Hontañón", in *Towards a History of Construction. Between Mechanics and Architecture,* Birkhäuser Verlag, Basel, 2002; George KUBLER, « A Late Gotic Computation of Rib Vault Thrusts », in *Gazette des Beaux Arts*, 1944, ser. 6, vol 26, pp. 135-148.

[306] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, , Librairie, Imprimeries réunis, Paris, 1854-1858, vol IV, p. 7. Roland Bechman estime que l'utilisation des triangles est un moyen de faciliter la construction. BECHMAN, Roland, *Les Racines des Cathédrales : l'Architecture Gothique, expression des conditions du milieu*, Payot Paris, 1989, p. 233.

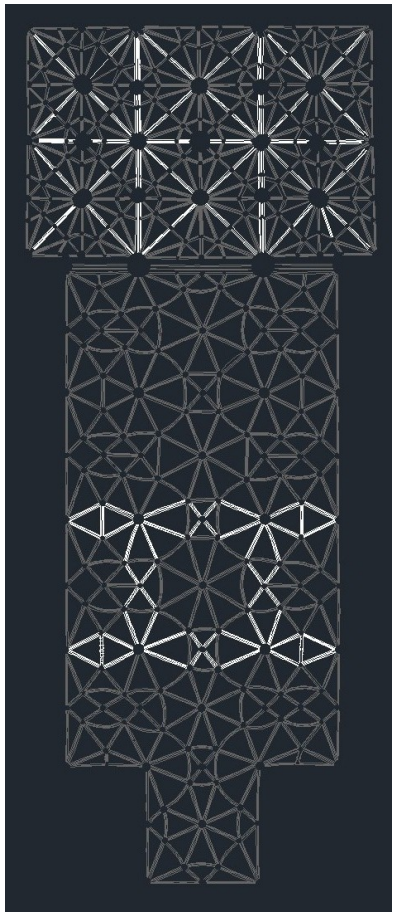


Figure 120. Plan des nervures
principales reliant les supports.
Des doubleaux et des ogives (transept) Des tiercerons et des liernes (nef).

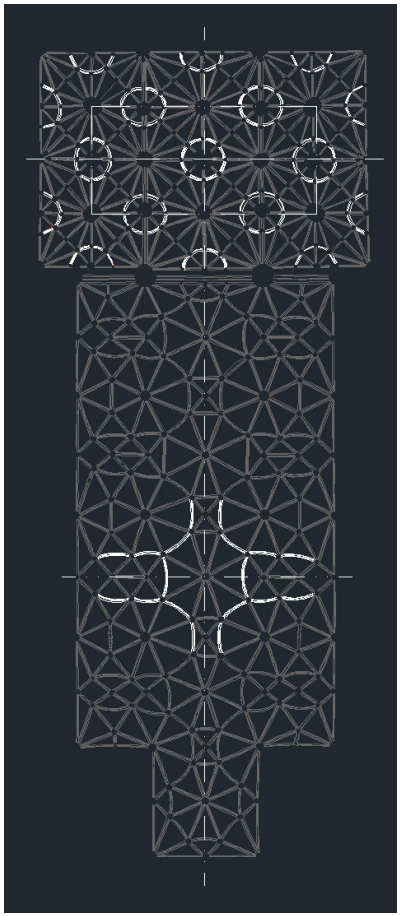


Figure 121. Plan des *combados*.
Localisation aux intersections de la voûte (nef) et sur les lignes faîtières (transept).

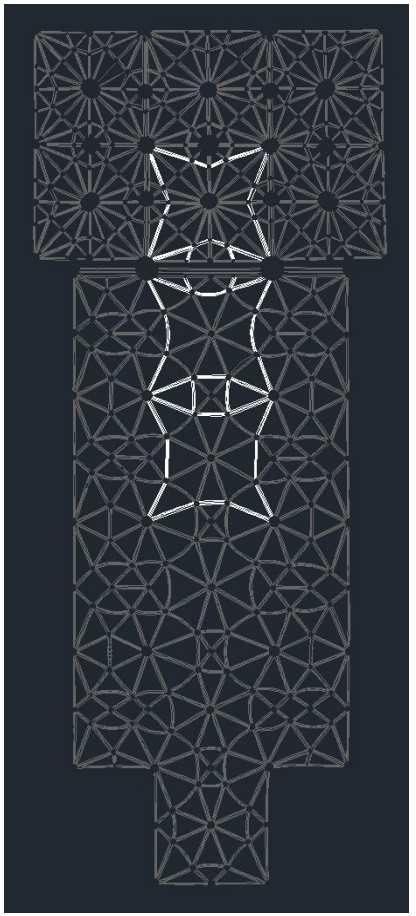


Figure 122. Tiercerons en étoiles.
Le carré central se transforme en demi-cercle au raccord avec le transept. Ce plan suggère l'existence d'un seul projet.

Ce système de triangulation aboutissant à une forme précise est encore un moyen utilisé de nos jours, à cette différence près que les triangles sont en acier. Mainstone, qui avait fait cette comparaison, remarque que l'objectif principal est d'obtenir un maximum de régularité et d'uniformité avec des éléments plus ou moins de même longueur, distribués uniformément sur la surface, à la place de les faire converger au sommet ; structurellement, il s'agit d'une forme rigide, tant pour sa propre courbure que pour la rigidité d'une surface assemblée par des triangles[307].

Ramisch affirmait que les croisées d'ogives contribuent à la résistance des voûtes aux vibrations produites par le mouvement des cloches, et que les voûtes d'arêtes simples (sans nervures) « finissent par s'écrouler ; mais les arceaux croisés, outre leur valeur ornementale, se soutiennent d'eux-mêmes, et répartissent plus uniformément la charge sur les contreforts appliqués contre les murs, surtout lorsqu'ils sont posés avec soin »[308]. Pour la construction des nervures, Ramisch remarque qu'il faut accorder une attention spéciale aux cintres, pour la verticalité et pour empêcher les déformations transversales à l'extrados des nervures[309]

Selon Ungewitter et Mohrmann (1890), la voûte en étoile permet de réduire les poussées, de diminuer la largeur des voûtains et leur épaisseur. Barthel (1991) distingue les nervures dont l'extrados est plat et celles qui ont un queutage pour recevoir les voussoirs et qui font aussi partie de la voûte[310].

Viollet-le-Duc fut le premier à théoriser le rationalisme gothique : toute la nervure est vue comme un renfort de la voûte et l'arc brisé présentait l'avantage de transmettre les poussées verticales. Les intersections des plans de voûte concentrent les forces et redirigent la poussée à travers les ogives vers des points d'appui[311] .

Pol Abraham s'oppose toutefois à cette conception et affirme que les nervures sont dommageables à la stabilité puisqu'elles rajoutent leur propre poussée[312].

En effet, on a critiqué la définition du rôle structurel de la nervure en se basant sur des impressions visuelles[313]. Cependant, nous sommes d'avis qu'il faut tenir compte d'autres données pertinentes,

[307] MAINSTONE, Rowland, *Developments in structural Form*, MIT Press, Cambridge, MA, 1975, p. 160.
[308] HOFFSTADT, Frédéric, *Principes du Style Gotique, exposés d'après des documents authentiques du Moyen Âge avec 40 planches in-folio, à l'usage des artistes et des ouvriers.* Traduit de l'Allemand par Théodore Aufschlager. Liège: E. Noblet, 1851, p. 337.
[309] ANDRES, Elena Pliego de, 'La geometría de las bóvedeas estrelladas del gotico tardio aleman', Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Santiago de Compostela, 26-29 octubre, 2011, p. 1152.
[310] ANDRES, Elena Pliego de, 'La geometría de las bóvedeas estrelladas del gotico tardio aleman', Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Santiago de Compostela, 26-29 octubre, 2011, pp 1151-1152
[311] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, , Librairie, Imprimeries réunis, Paris, 1854-1858, vol. IV, p16 ; p109.
[312] ABRAHAM, Pol, « Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval ", in Bulletin Monumental, vol. 93, Société Française d'Archéologie, Musée des Monuments Français, Paris, 1934, p. 74.
[313] ALEXANDER, D. K.; MARK, R., "The Structural Behavior of Medieval Ribbed Vaulting", in *Journal of the Society of the Architectural Historians*, vol. 36, 1977, p. 241.

notamment les détails de construction.

À Belém, nous ne pouvons pas affirmer que les nervures sont exclusivement décoratives ; grâce à leurs profils, elles incorporent la maçonnerie et intègrent la construction et donc sa structure[314].

Une théorie récente de Jacques Heyman[315] se rapproche de la vision de Viollet-le-Duc : il qualifie les lignes d'intersection de parties *faibles* de la voûte, où la concentration des poussées est la plus forte. C'est pourquoi les sections des nervures varient selon la forme de la voûte : dans une croisé d'ogives, les diagonales sont les nervures les plus importantes, alors que dans la voûte en coupole, ce sont les transversales.

Ces théories vont dans le sens de l'opinion de Rodrigo Gil. Cependant dans la nef, les nervures curvilignes situées aux intersections des différents plans de voûte sont les plus fines, et elles sont placées pour la plupart entre les reins et le berceau.

L'étude des nervures curvilignes par ordinateur a démontré que celles-ci étaient coïncidentes avec des lignes de concentration de poussées[316].

Dans les deux voûtes, les *combados* sont placés sur les axes des lignes faîtières.

Dans la nef, la succession des *combados* délimite la forme en berceau. Les courbes décrites par les *combados* semblent rediriger les forces pour soulager le sommet de la voûte. L'octogone est constitué de nervures convexes qui semblent contrarier les poussées d'un berceau ou d'une coupole. En arrivant aux losanges, entre les deux paires de colonnes, les *combados* concaves semblent recevoir les poussées et les rediriger vers les piliers.

Dans le transept, les *combados* sont situés aux angles des losanges et ils relient les croisées, comme un chaînage dans la maçonnerie, grâce au détail de leur queutage relevé à l'extrados.

3.2.5 *Les tas de charge*

C'est au tas de charge que les nervures fusionnent pour prendre appui sur un pilier ou une console. La voûte et en particulier le tas de charge, comme le relève Viollet Le Duc, sont conçus du haut vers le bas. Les nervures fusionnent au tas de charge sur des claveaux communs qui résistent à la pression du remplissage des reins.

[314] FITCHEN, John, *The Construction of Gothic Cathedrals: A Study of Medieval Vault Erection*, The Clarendon Press, Oxford, 1961, p.69. «quand les nervures rentrent dans la maçonnerie elles sont structurelles, en augmentant l'épaisseur et force de la voûte».

[315] HEYMAN, Jacques, *Structural Analysis of Masonry*, Jnl. of the Cambridge Un. Eng. Soc., vol. 37, 1967, p. 56.

[316] ACLAND, James H., *Medieval Structures: The Gothic Vault*, University of Toronto Press, Toronto, 1972, p. 207. Ceci est vu par cet auteur comme moyen utilisé pour visualiser les jeux de forces dans la voûte, malgré que plus tard les nervures courbes tendent à perdre cette définition pour devenir simplement décoratives.

L'interpénétration des nervures permet en outre de diminuer la section des piliers.[317].

Les Figure 123 et Figure 124 montrent des détails des tas de charges de la nef. La hauteur de l'arrachement des nervures est variable. Sur les consoles, l'arrachement des nervures est beaucoup plus élevé pour les deux nervures centrales qui vont vers les colonnes (Figure 123). De même, les tas de charge des colonnes présentent deux hauteurs différentes : les sommiers des nervures tournés vers la nef centrale sont plus hauts que ceux qui sont tournés vers les murs (Figure 124). Les nervures naissent à des hauteurs différentes pour arriver à la hauteur désirée. Les clefs des nervures qui naissent plus haut sont également plus élevées. Les claveaux restent horizontaux jusqu'à ce que la nervure se dégage à l'extrados. Leurs lits sont dirigés vers le centre de la courbe.

Quand on observe le tas de charge du transept, l'idée de la valeur structurelle de la nervure perd de sa force. Pour éviter une « collision » des 9 nervures qui convergent aux consoles et aussi pour alléger la voûte, les arcs doubleaux et diagonaux s'interrompent par un décor sculpté avant d'arriver au tas de charge (Figure 125).

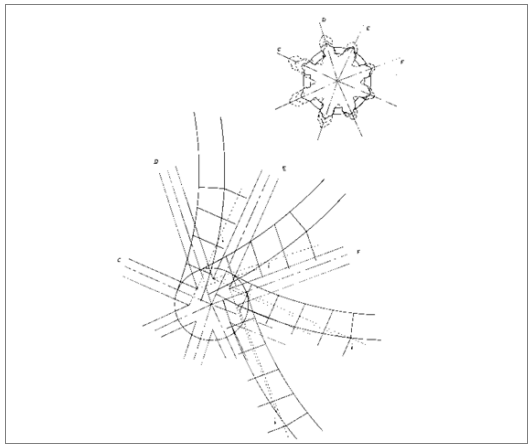
Il est apparemment peu logique d'interrompre les principaux éléments d'appui avant la console, ce qui contredit l'idée selon laquelle les nervures joueraient un rôle structurel.

À notre avis, plus qu'un choix esthétique, ce détail révèle une intention particulière de João de Castilho et démontre sa capacité à maîtriser les questions structurelles des voûtes. Outre qu'il réalise des voûtes de formes et de dimensions uniques, Castilho montre également de l'audace dans les détails. La nervure n'était-elle pas un élément structurel essentiel et calculé en fonction de la portée, comme le postulait Rodrigo Gil de Hontañon ?

Malgré cette particularité des tas de charges, on trouve des contreforts extérieurs disposés à 45º, dans le sens des ogives, une disposition courante pour les contreforts des voûtes en croisée d'ogives dans les voûtes manuélines (Figure 126). Les diagonales constituent des lignes de concentration accrue des forces. Le fait que Castilho a choisi d'interrompre les ogives au tas de charge signifie que la distribution des poussées se produit à l'intérieur de la maçonnerie et non dans la partie saillante visible de la nervure, et n'invalide pas la valeur structurelle des nervures quant à leur queutage rentrant.

[317] VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Librairie, Imprimeries réunis, Paris, 1854-1858, vol. IV, p. 516.





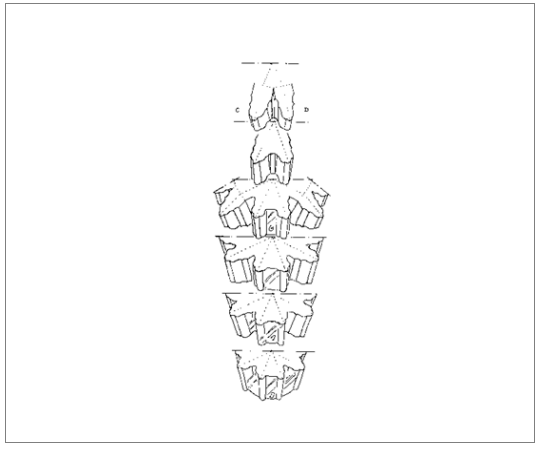
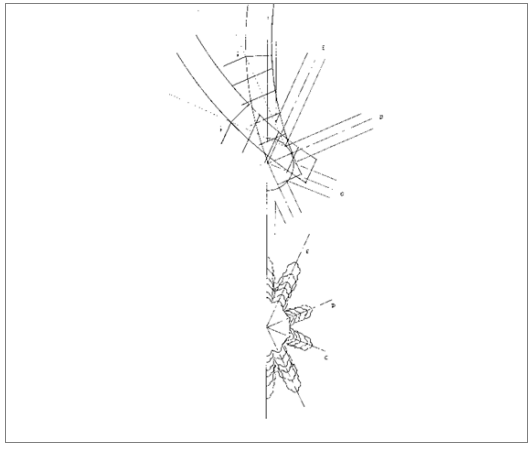



Figure 123. Photos des tas de charges de la nef sur la colonne et la console.
Figure 124. Dessins des tas de charges de la nef.
3D, plan et élévation des nervures, montrent l'arrachement des nervures à plusieurs niveaux. (Monteiro-Genin, 1995)



Figure 125. Tas de charge de la voûte du transept.
Les arcs doubleaux et les ogives s'interrompent par un décor sculpté.



Figure 126. Façade este du transept.
Contreforts extérieurs disposés à 45º, dans le sens des ogives.

3.2.6 *Les voûtains*

Contrairement au problème du rôle structurel des nervures, la fonction de cintrage de celles-ci pour la pose des voussoirs n'est pas remise en question. L'observation du plan des voussoirs le montre bien (Figure 127). Normalement, on pose de simples dalles entre les nervures. Cette manière de procéder permet de disposer les voussoirs concentriquement. Dans les octogones de la nef, ces voussoirs peuvent atteindre une longueur de 2,5m. On notera également que ces pierres, à double courbure, ont une épaisseur de 0,10m seulement.

L'observation stéréoscopique ou directe de l'intrados confirme la double courbure de ces voussoirs. Leur section est courbe tant dans le sens longitudinal du voûtain, que dans le sens transversal (nous avons mesuré une concavité de 0,05m à l'un des voussoirs des reins).

1- Dans la nef, les octogones et les carrés centraux délimitent des calottes sphériques. Ces formes sont produites par des nervures de même courbure, nous le verrons plus tard, bien que le plan défini par les voussoirs ne soit pas hémisphérique, puisque ceux-ci sont tous concaves entre les nervures.

La pose des voussoirs dépend de la manière que le maçon juge convenir le mieux à la forme concave produite par les nervures[318].

[318]FITCHEN, John, The Construction of Gothic Cathedrals: A Study of Medieval Vault Erection, The Clarendon Press, Oxford, 1961, p. 261.

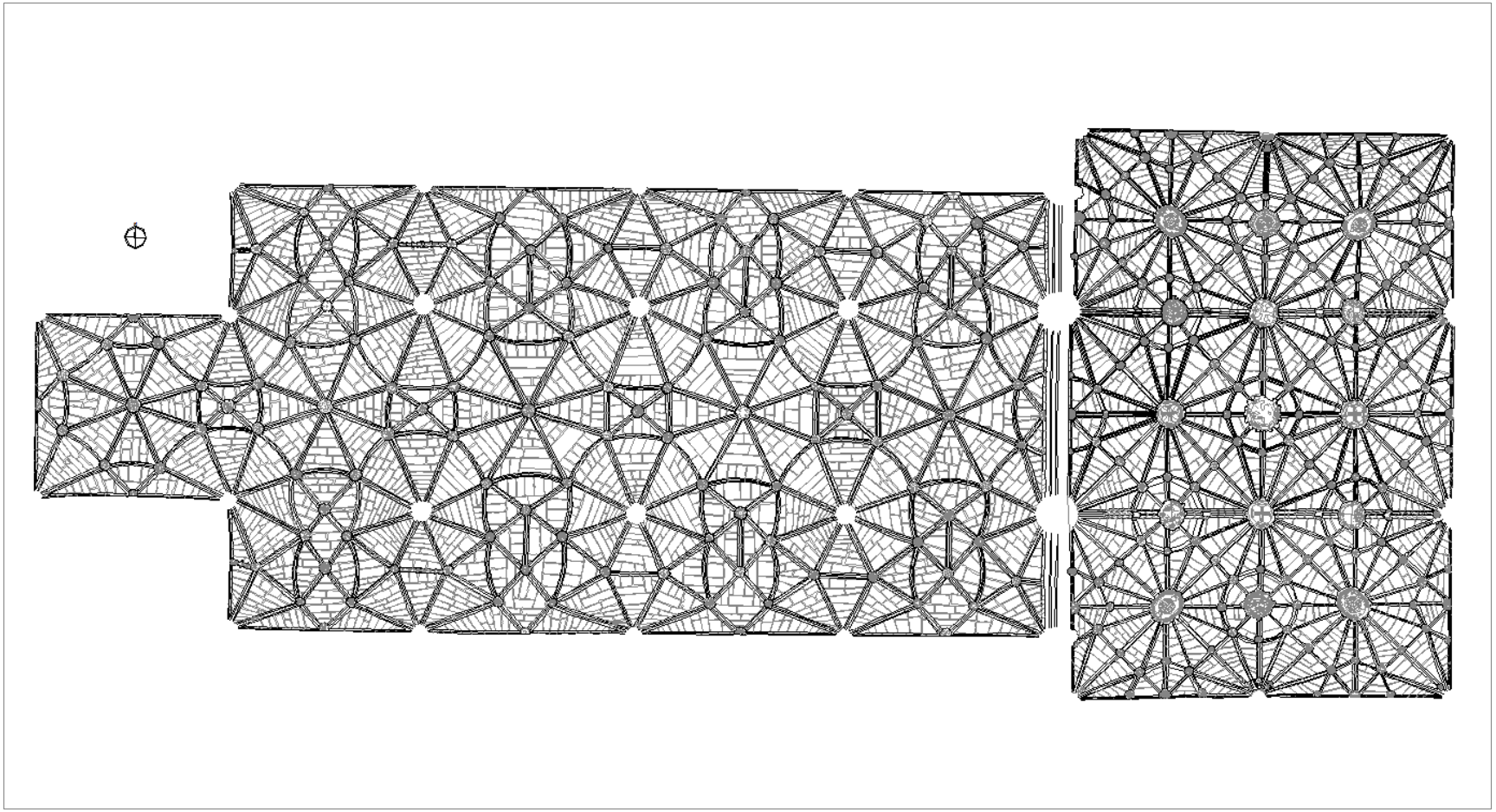


Figure 127. Plan photogrammétrique montrant la disposition des voussoirs. (Genin, 1999)

La disposition des voussoirs varie d'une travée à l'autre. Les deux travées centrales montrent une plus grande rigueur d'exécution : les blocs sont toujours disposés concentriquement par rapport à la clef centrale de chaque travée. Les voussoirs des deux travées des extrémités sont de dimensions moindres et, dans la travée jouxtant le transept, leur disposition est très aléatoire et désordonnée.

Ces différences trahissent des phases de construction distinctes. Il est permis de penser que les travaux auraient commencé par la zone centrale. L'étude historique suggère que les travaux auraient été interrompus de 1519 à 1522, date du contrat d'exécution des piliers et de la voûte du transept, et en principe aussi de la dernière travée de la nef.

Aux reins, les voussoirs sont visiblement plus plats à la base des voûtains mais plus ils sont placés en hauteur, plus ils deviennent concaves entre les nervures.

Entre les octogones et les murs, les voussoirs suivent le plan du sommet, mais ils restent toujours concaves dans le sens transversal. La forme est là celle d'un berceau simple.

La double courbure augmente la rigidité de la voûte. Chaque voûtain est comme une petite voûte. Les poussées de chaque voûtain sont ainsi canalisées vers les nervures et redistribués à travers elles vers les supports. C'est normalement pourquoi certaines études structurelles révèlent une concentration des poussées sur les nervures, conséquence naturelle de la forme et de la stéréotomie des voussoirs.

Dans les voûtains, on observe des trous qui servaient à faire passer des cordes servant à manœuvrer les échafaudages et à démonter le cintrage une fois la construction terminée[319]. Ils sont disposés régulièrement sur les reins côté mur de chaque colonne et près des clefs des octogones des deux premières et dernières travées.

2 - Il faut analyser la disposition des voussoirs du transept pour mieux comprendre le rôle des *combados* dans la maçonnerie. Les voussoirs sont disposés concentriquement par rapport aux appuis et par rapport aux clefs de la voûte.

Les *combados* permettent de changer la direction des voussoirs aux angles des losanges en faveur d'une disposition concentrique, au lieu de former des angles dans les coins des losanges. Ce système permet de relier tous les voûtains qui aboutissent au *combados*.

Dans cette voûte en particulier, ces nervures, de par leur disposition, rigidifient la voûte et servent à empêcher les mouvements horizontaux.

La rigidité d'une structure augmente si on lui rajoute des éléments intermédiaires, perpendiculairement à la structure principale. Tel est le rôle des liernes dans le système des structures en bois. En maçonnerie, nous pouvons comparer les nervures courbes qui lui sont incorporées aux parpaings d'un mur, qui, de par leur position perpendiculaire au mur, s'opposent aux poussées horizontales et confèrent rigidité et résistance aux murs.

[319] BECHMAN, Roland, *Villard de Honnecourt, La Pensée Technique au XIII siècle et sa Communication*, Picard, 1991, p.264.

3.2.7 *Les clefs*

À la fin du gothique, la multiplication des nervures rend les clefs plus complexes et difficiles à tailler[320]. Cependant, dans la nef et d'une manière générale, elles dénotent un travail assez ordinaire, elles sont cylindriques et dépourvues de branches. Seules les clefs adossées aux murs présentent des branches de raccordement vers les nervures qu'elles relient (Figure 128).

Les clefs sont verticales ou inclinées, selon le plan de la voûte et le positionnement des cintres. Il est intéressant de constater que toutes les clefs qui sont disposées sur la ligne faîtière transversale ne sont pas verticales, ce qui suppose qu'une grande cerce a été utilisée pour trouver l'emplacement des clefs le long de la travée.

L'examen des clefs révèle que parfois la taille a été effectuée au moment de la pose des derniers segments de nervures. Un tailleur de pierre nous a confirmé qu'il s'agissait d'un travail de taille fait sur place, y compris la sculpture réalisée après la pose, comme des décors de petites fleurs sur le corps des clefs.

Les clefs sont parfois considérées comme un élément empêchant les arcs de se soulever[321]. Cette considération n'est toutefois pas pertinente. Les plus grandes clefs sont situées au sommet d'arcs

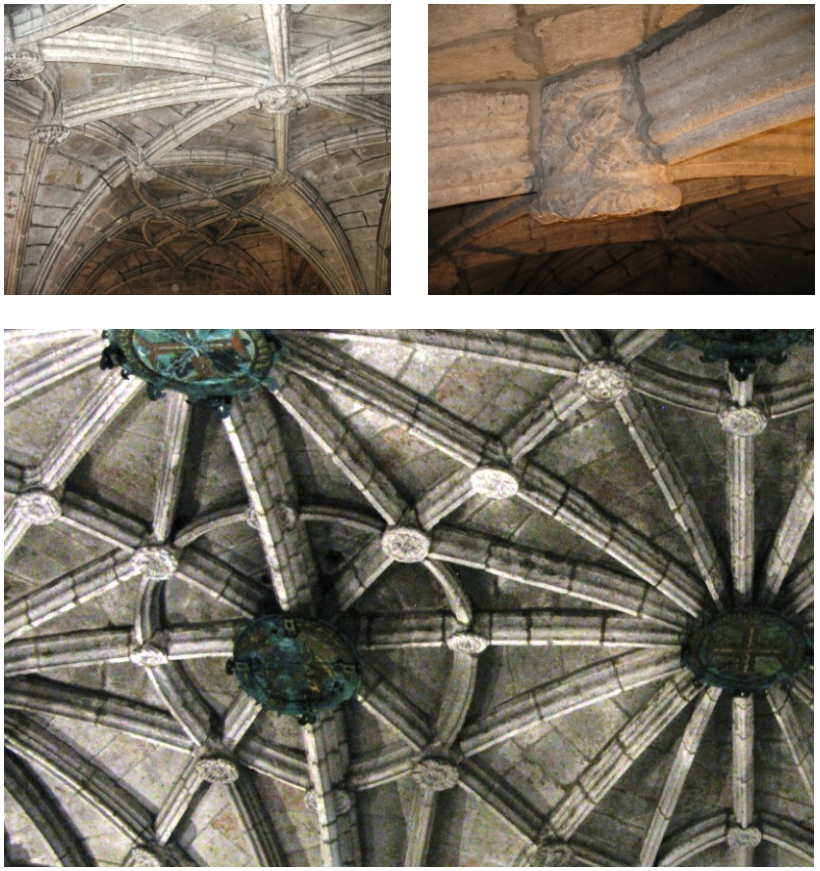


Figure 128. Clefs des voûtes de la nef (en haut) et du transept (en bas).
Les clefs sont cylindriques, sans branches de raccordement aux nervures. Dans la voûte du transept elles semblent être des claveaux (des liernes faîtières et des ogives).

[320] PALACIOS GONZALO, José Carlos, *Trazas y Cortes de Cantería en el Renacimiento Español*. Dirección General de Bellas Artes y Archivos, Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Madrid, Madrid, 1990; reedité. Munilla-Lería, Madrid, 2003, p. 221.

[321] JOWAY H. F., « Etude de la structure d'édifices gothiques », in *Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics*, nº 363, 1978, p.57.

surbaissés insensibles au soulèvement, au centre des carreaux et des octogones.

Dans la nef, nous pouvons considérer l'exemple des *central spandrels* des voûtes anglaises qui constituent - structurellement - de véritables grandes clefs centrales. Leur poids permet de réduire les forces de traction développées dans la partie supérieure du conoïde[322]. De par leur forme et leur position sur la voûte, les octogones et les carrés suggèrent une intention de même nature dans la recherche de l'équilibre et l'organisation de l'espace. Rappelons à ce propos qu'à l'extrados de la nef, un petit mur suit l'axe de la nef sur toute sa longueur

2- Dans le transept, les clefs sont similaires à celles de la nef. Elles sont cylindriques, sauf celles qui sont sur les ogives et les lignes faîtières lesquelles font partie des claveaux de ces nervures. Des blasons cachent des clefs où le croisement est plus complexe, avec seize nervures.

3.2.8 *Les colonnes*

Les colonnes de la nef ont une hauteur de 17,00m sous le chapiteau. Elles sont très sveltes, de section octogonale inscrite dans un cercle de 1m de diamètre. Les 2 dernières colonnes qui bordent le transept présentent quatre faces circulaires, de même section horizontale que les colonnes de la nef. Leur largeur totale est de 2,20m. Il est intéressant de retrouver la même section horizontale dans les deux types de colonnes (nef et croisée), autre analogie architecturale entre la nef et le transept. (Figure 129).

Nous avons procédé à l'auscultation des colonnes par sondage à ultrasons, travail qui a été réalisé par le LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).

Le calcul des longueurs d'ondes ne permet pas d'identifier l'origine d'une perturbation mais permet de détecter des irrégularités dans le matériau telles que des fissures, des vides ou des décollements. L'auscultation visait à vérifier si les colonnes étaient constituées d'assises monolithiques ou si elles contenaient des vides ou d'autres matériaux. En somme, pour identifier leur constitution intérieure.

Trois colonnes ont été sondées : la colonne située du côté sud, entre la nef et le transept, et les colonnes nord et sud, situées entre la deuxième et la troisième travée de la nef. Les lectures ont été effectuées à une hauteur de 1,00m environ, ainsi qu'à 6,35m pour la colonne nord de la nef (Figure 130).

Les résultats montrent que les assises des colonnes sont soit monolithiques soit constituées de deux blocs, dans la nef, et de quatre blocs dans le transept.

Dans deux des sections, nous avons obtenu des vitesses très basses. À la colonne du transept, indiquant la présence de fissures, et à 6,35m dans la colonne nord de la nef, pour des raisons non identifiées. Les vitesses plus faibles peuvent indiquer par un calcaire

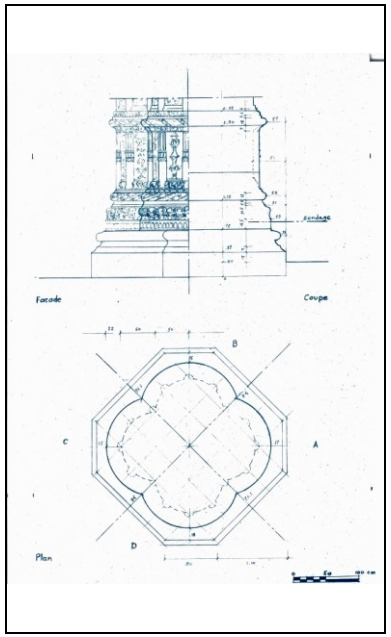
[322] HEYMAN J.4, "Spires and Fan Vaults", in *International Journal of Solids Structures*, vol. 3, 1967, p. 250.

de type différent, un état de fissuration, ou des circonstances constructives qu'il ne nous est pas possible d'identifier (vides, crampons, bois, etc.). Nous estimons qu'il serait utile de refaire des essais avec des transducteurs de plus haute fréquence, ou d'utiliser une autre méthode permettant de déterminer la constitution du tambour du fût. La méthode qui a été utilisée n'identifie pas l'origine des perturbations mais est très utile comme moyen de recherche préalable.

3.2.9 *Dégradation des matériaux*

En nous basant sur des dessins de photogrammétrie des voûtes de la nef et du transept, nous avons relevé les types de pierre et de mortier ainsi que les désordres qui ont été identifiées à l'intrados des voûtes. L'étude de l'intrados a été réalisée par observation visuelle. Ce relevé a également été utilisé pour faire le registre des diagnostics de l'extrados.

Nous l'avons vu, les deux travées centrales de la nef diffèrent des autres quant à la disposition de leurs voussoirs. Elles présentent des différences quant au type de pierre et de mortier de rejointoiement. Le calcaire de type Liós constitue l'ensemble des nervures et des clefs. Au niveau des voûtains des deux travées centrales, on trouve une plus grande concentration de calcaires jaune et rouge (du type *Encarnadão*). Dans ces travées, les joints sont plus fins et les mortiers sont plus clairs, et peut-être encore originaux, à base de chaux aérienne, comme dans l'extrados. Dans les travées extrêmes,



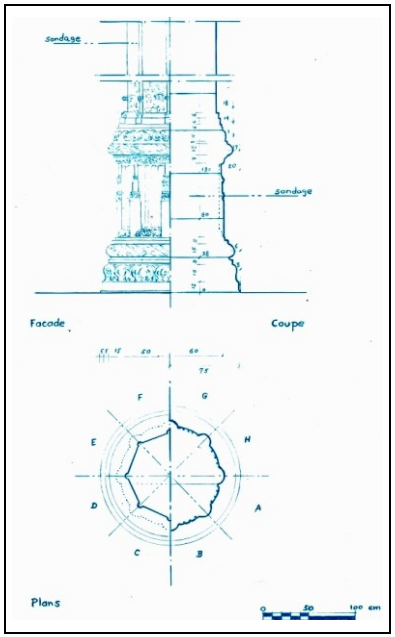






Figure 129. Dessins des colonnes du transept (gauche) et de la nef (droite).
La colonne du transept est constituée de quatre blocs identiques à ceux de la nef.
(Monteiro-Genin, 1995)
Figure 130. Sondages aux colonnes du transept et de la nef (Monteiro-Genin, 1995)

on trouve d'autres types de pierre, et les joints sont d'un mortier très foncé contenant des liants de type chaux hydraulique et ciment Portland.

Nous présentons ici le registre des anomalies et des restaurations que nous avons pu identifier et qui nous ont paru les plus pertinentes en ce qui concerne les aspects structurels des deux voûtes (Figure 131) Ont été identifiés :

- Restaurations : nous basant sur le plan des années 1930, nous

avons localisé les nervures qui ont été restaurées. On distingue les restaurations identifiées et non-identifiées. Dans la nef, une grande partie des restaurations ont pu être identifiées. Pour le transept, les restaurations sont pour leur majorité non identifiées ; soit les douelles ont été restaurées en totalité soit elles ne l'ont pas été. Notons que les zones d'intervention sont coïncidentes avec les lignes faîtières des deux voûtes. Les nervures qui ont été restaurées sont situées dans la nef sur toute la longueur des axes transversaux, en particulier dans les deux travées centrales. Dans la voûte du transept, les interventions sont concentrées sur les lignes du rectangle qui relient les six croisées d'ogives. Cela peut signifier qu'il s'agit des zones soumises aux plus fortes contraintes et où les désordres sont plus nombreux, ou cela signifie que la pierre se dégrade en conséquence de l'oxydation de crampons en fer. Si la présence de ceux-ci se confirme, cette zone de nervures surbaissées et horizontales serait la plus naturelle.

- Érosion : dans la nef, on trouve les douelles les plus affectées au

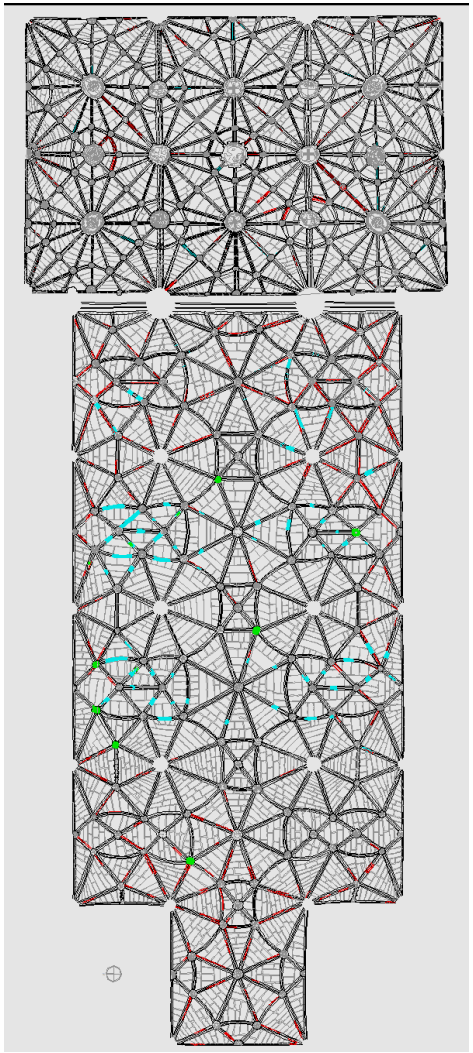


Figure 131. Registre des anomalies et des restaurations des deux voûtes.
Restaurations (bleu) ; Érosion (rouge) ; Lacunes (vert).
(Genin, 1999)

niveau des nervures de la première travée et de la tribune et à la naissance des nervures des murs nord et sud. Rappelons qu'un document d'archive fait état de dégradations dans la nef nord, où nous avons été témoin direct de la chute d'un fragment. Dans le transept, on retrouve des traces d'érosion de forme plus dispersée.

- Éléments lacunaires : ce sont surtout les clefs qui présentent le plus de parties manquantes. Dans la nef, on n'en trouve que quatre cas, dont trois sur des restaurations, ce qui suggère une piètre efficacité de l'intervention.

3.2.10 *Relevé de la verticalité des murs et des colonnes*

Nous avons vérifié la verticalité des murs nord et sud de l'église. Les murs sont légèrement bombés vers l'intérieur, à raison de 3 et 8 cm, rien de très significatif.

Les colonnes ne présentent pas de grandes déformations dans le sens longitudinal. Par contre, dans le sens latéral, elles s'écartent vers l'extérieur. Leurs écartements varient de 5 à 18 cm. En regardant la résultante de chaque paire de colonnes, signalons encore un décalage de 30cm entre les deux premières colonnes de la nef (Figure 132).

Comme les déformations sont orientées dans le sens des forces, on peut en conclure qu'il ne s'agit pas d'un comportement de voûte en berceau caractérisé par des poussées en direction des murs, ceux-ci ayant peu bougé. Le déversement des piliers vers l'extérieur est courant dans presque toutes les églises gothiques à trois nefs, en conséquence de la plus grande portée de la nef centrale.

3.2.11 *Évaluation de la stabilité par la méthode des éléments finis*

L'étude de la stabilité par la méthode des éléments finis [323] a confirmé les résultats précédents.

La stabilité de la voûte a été évaluée pour les charges verticales : modélisation de la voûte à travers les éléments finis, en admettant un comportement linéaire et non linéaire ; évaluation des tensions maximales installées en traction et en compression pour la voûte et en compression pour les piliers ; évaluation de la sécurité de la voûte et des piliers par rapport à leur état-limite ultime, dont nous résumons les résultats.

- Les déformations s'avèrent être du type *portique*, avec un déportement des murs et des piliers vers l'extérieur (Figure 133);
- Les tensions principales en traction se produisent au niveau des nervures et des piliers et présentent des valeurs faibles au niveau du remplissage (pierre + blocage de revêtement) ; les valeurs maximales sont assez élevées (environ 5,0 MPa), un indice de fendillement dans la voûte ; le fendillement apparaît dans les zones de tensions accrues : dans les paires de nervures transversales qui

[323] LOURENÇO, Paulo B., KRAKOWIAK, Konrad J. – *Avaliação da estabilidade da igreja do mosteiro dos Jerónimos*, Relatório 03-DEC/E-02, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Maio 2003 (rapport non publié).

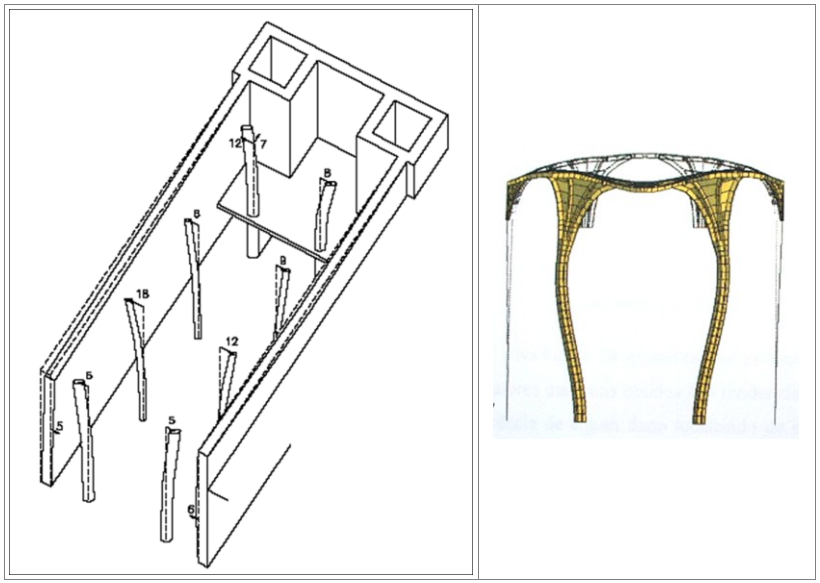


Figure 132. Verticalité des murs et des colonnes.
Relevé topographique.
(Monteiro-Genin, 1995)

Figure 133. Déformations du type *portique*.
Méthode des éléments finis.
(Lourenço, Krakowiak 2003)

relient les piliers, dans l'octogone, à proximité de la clef et dans les nervures longitudinales entre les piliers. Le fendillement se produit également dans le remplissage central et longitudinal de la voûte (Figure 134A)

- Les tensions en compression sont modérément élevées (environ 5,0 MPa), signe d'un dommage localisé dû à l'écrasement de la pierre. Les valeurs de compression les plus élevées sont obtenues au sommet des piliers, et ensuite dans les nervures des reins de la voûte (Analyse élastique). Les zones de plus grande compression sont celles qui correspondent aux nervures transversales des reins de la voûte, entre les piliers et dans les piliers (Analyse non-linéaire). (Figure 134B)

Concernant les piliers :

- L'écartement des piliers mesuré (2,6cm) est très inférieur aux mesures obtenues par topographie (6 à 18cm);
- Les piliers du transept présentent un niveau de sécurité suffisant, tandis que celui des piliers de la nef est insuffisant.

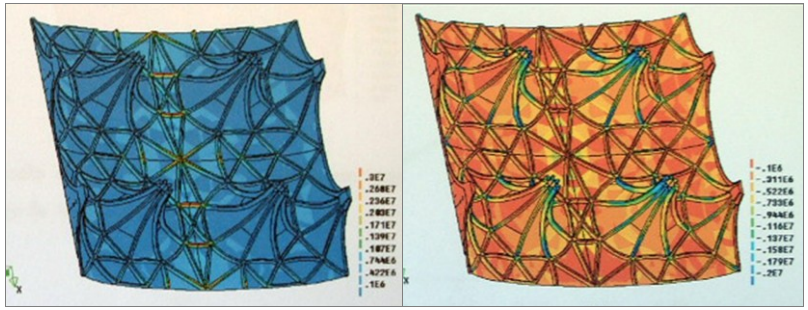


Figure 134. A – tensions en traction ; B – tensions en compression.
(Lourenço, Krakowiak 2003)

3.3 Cloître hospitalier du couvent du Christ à Tomar

3.3.1 *Description des voûtes*

Notre projet reprenait les ailes nord et ouest du cloître et la salle de la morgue contiguë du côté nord. La construction, par João de Castilho, du premier étage et du second a été achevée en 1543. Le cloître a subi deux modifications importantes : la construction d'un second étage à l'aile nord en 1620 et la démolition du premier étage de l'aile sud en 1843-1845, pour dégager la visibilité de la fenêtre de la tribune de l'église.

La Figure 135 présente le plan et un modèle tridimensionnel de la surface qui a été analysée. Les différents espaces et éléments architecturaux sont identifiés comme suit : aile nord (N), aile ouest (O), façade (A), mur intérieur (B), consoles (M), clefs (C), nervures (M-C ou C-C).

Le plan carré du cloître hospitalier est ceint de murs intérieurs épais en maçonnerie mixte (B) et par des piliers-contreforts de forme irrégulière et de colonnes de 0,40m de diamètre qui supportent des arcs semi-circulaires en maçonnerie de pierre (façade A).

Les ailes sont composées de quatre travées rectangulaires de longueur variable, délimités par les piliers-contreforts et par des consoles incorporées dans les murs intérieurs.

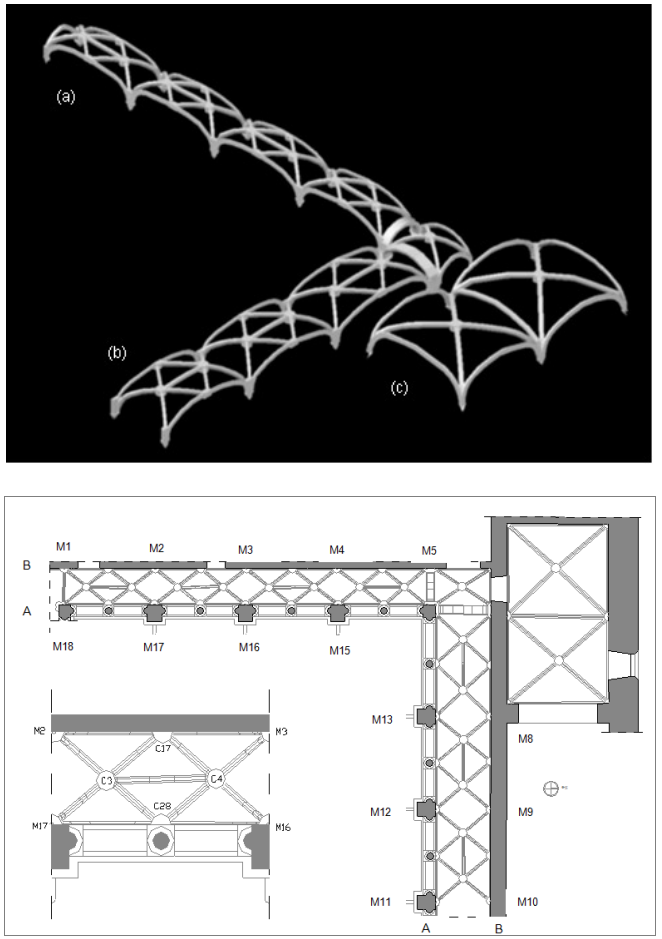


Figure 135. Voûtes du cloître hospitalier à Tomar.
(Genin, 2006)

La voûte du cloître est constituée par des nervures composées, chaque travée est formée de deux croisées de tiercerons. Les tiercerons partent des consoles des piliers/contreforts, à environ 45º en plan, pour rejoindre les clefs situées sur le mur opposé. Au centre, ils délimitent un losange plat. La ligne faîtière longitudinale est à niveau (Figure 136).

Ce jeu de nervures et l'absence d'arcs transversaux unifie les travées et tend à créer une forme de voûte unique dans chaque aile du cloître. Celle-ci s'apparente à un berceau surbaissé à nervures en anse de panier (Figure 137).

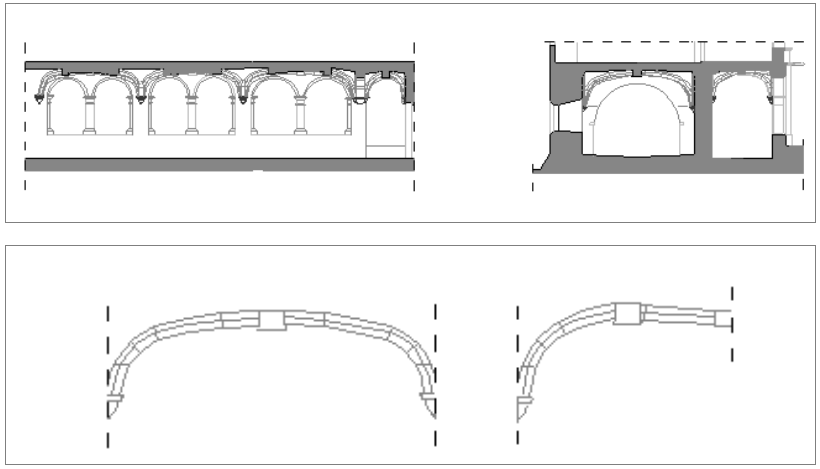


Figure 136. Sections du cloître Hospitalier. (Genin, 2006)
Figure 137. Élévation des nervures : formeret et tierceron (nervure composée). (Genin, 2006)

3.3.2 *Détails constructifs*

Les voûtes sont en maçonnerie de brique au mortier de chaux. La maçonnerie est constituée de briques d'environ 0,27m x 0,13m x 0,04m avec un des joints au mortier de chaux d'une épaisseur de 2 à 3cm. L'épaisseur minimale des voûtes est d'environ 0,35m dans le cloître et de 0,45m dans la salle de la morgue. L'extrados est revêtu de carreaux céramiques sur mortier et forme le carrelage du premier étage.

Le détail des reins de la voûte est caractéristique du gothique final, avec des premiers rangs monolithiques, là où les nervures se croisent en se séparant à des hauteurs différentes (Figure 138 A). Les nervures présentent un extrados plat aligné sur le plan de la maçonnerie en brique et elles sont dépourvues de queutage intégrant la voûte (Figure 138 B). La maçonnerie doit être comme nous le montrent les ruines du chapitre, avec des briques placées perpendiculairement au plan et aux limites de la voûte (Figure 138 C).

Dans l'aile nord, d'autres désordres structurels ont été constatés, notamment au niveau des claveaux, dont 8 présentent des signes d'affaissement au sommet de la voûte, zone plus sensible vu sa disposition quasiment horizontale. Dans la salle de la morgue contiguë au cloître nord, les désordres les plus flagrants sont les fissures qui courent les longs des voûtes, parallèlement aux façades.

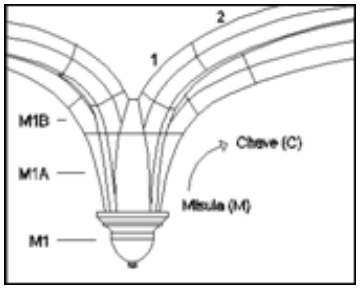






Figure 138. Détails constructifs de la voûte.
A – Tas de charge : Les premiers rangs des nervures sont monolithiques
B - Nervure : l'extrados des nervures est plat aligné sur le plan de la maçonnerie.
C - Voutains : maçonnerie de brique disposées perpendiculairement aux murs.
Photo des ruines du chapitre. (Genin, 2006)

3.3.3 *Déformations verticales et horizontales*

Les ailes nord et ouest présentent respectivement des largeurs de 3,16m et 2,06m. Les travées présentent une longueur variable comprise entre 5,01m et 5,21m dans l'aile ouest, et entre 5,28m et 5,32m au nord.

Considérant que la cote du dallage nord-ouest est à 3,10m, les cotes sous les clefs centrales varient entre 7,37m et 7,41m dans l'aile nord, et entre 7,28m et 7,45m dans l'aile ouest. Les cotes des consoles dans l'aile nord varient entre 6,24m et 6,32m en A et entre 6,28m et 6,30 au mur B. Les cotes des consoles de l'aile ouest varient entre 6,24m et 6,34m en A et entre 6,23m et 6,31m au mur B. La cote du sol du premier étage est à 8,07m dans la galerie du cloître et de 8,00m au-dessus la salle de la morgue.

Le relevé indique des écarts dans l'horizontalité. Dans le cloître, presque toutes les consoles du mur (B) sont situées à une cote inférieure à celles de la façade (A), avec un écart de niveau maximal de 0,07m dans l'aile ouest, entre M2 et M17. Au premier étage du corps nord, au-dessus de la salle de la morgue, on trouve des cotes plus basses le long de l'axe longitudinal, par affaissement qui a provoqué la déformation des linteaux et des fissures visibles dans tous les murs transversaux. L'écart de niveau maximal observé dans le dallage était de 2,5cm, mais les dallages étant récents, on peut supposer que le dénivelé d'origine aura été corrigé.

On observe également des écarts de verticalité dans le cloître. On a également confirmé que la majorité des points d'appui présentent

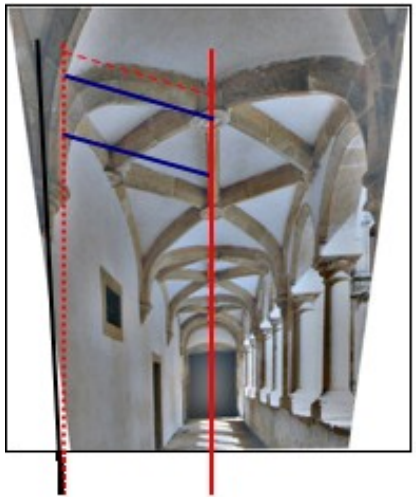


Figure 139. Déformations horizontales.
(Breda, 2004)

des écarts variables. L'écartement maximal mesuré est de 0,07m dans l'aile nord, entre M8 et M13.

3.3.4 *Analyse géométrique des déformations*

Déformations horizontales

Différents mouvements ont été constatés pour l'ensemble de la construction. Ces déformations ne sont pas très visibles car ces murs ont été réparés par des enduits à plusieurs reprises. Ces mouvements peuvent être déduits à partir de la déformation de l'angle entre le linteau et les montants des portes des murs transversaux du premier étage. On [324] a ici constaté qu'il existait des fissures prenant naissance en diagonale aux extrémités des linteaux. Une prise de mesure approximative du déplacement a indiqué une dizaine de cm. On retrouvera peut-être la même différence entre les parties A et B du côté nord (Figure 139). Nous émettons une certaine réserve quant à l'horizontalité mesurée à partir des consoles, dans la mesure où certaines d'entre celles-ci pourraient ne pas avoir été rétablies dans leur position d'origine lors de différentes restaurations. Le même phénomène se répète dans l'aile ouest.

Malgré l'ampleur de ces mouvements, leur influence sur l'état des voûtes est moindre que celle des déformations verticales.

Déformations verticales [sortie d'aplomb]

Soit une nervure de longueur horizontale de 187cm, sa longueur d'origine avant déformation = A = 187cm - 7cm = 180cm.

La hauteur de la voûte avant déformation, à partir du dernier joint horizontal = B

La ligne imaginaire entre le dernier joint horizontal et la clef = C

[324] BREDA, K.: *Onderzoek van de gewelven van het Convento de Cristo, Claustro da Hospedaria*, Tomar, Portugal, Karel Breda, Architectuurbureau, rapport réalisé pour l'IPPAR en décembre 2004 (non publié).

dans la position d'origine et C' dans la position actuelle.

La largeur actuelle de la voûte, compte tenu de la sortie d'aplomb = A'= 187cm

Nouvelle hauteur de la voûte après abaissement = B' = 70cm. Soit 40cm au-dessus de la console.

L'abaissement = V = B-B'

On peut en déduire que C reste constant étant donné que la nervure est considérée comme un corps rigide et que les pierres des nervures sont considérées comment ayant des raccords rigides entre elles également. La pose de coins en bois contient, pour l'instant, l'aggravement des déformations.

Ainsi, l'égalité suivant est valide pour les deux couloirs du cloître :

$A^2+B^2=C^2=A'^2 + B'^2$

$B' = \sqrt{(A^2+B^2-A'^2)}$

Pour l'aile nord, la sortie d'aplomb est au plus de 7cm par demi-portée :

$B'= \sqrt{(187^2+70^2-180^2)} = 86,42$ cm

V= 86.42 – 70 = 16,42cm

Pour l'aile ouest, avec une sortie d'aplomb au plus de 5cm par demi-portée

$B'= \sqrt{(139^2+70^2-134^2)} = 79,15$cm

V= 79,15 - 70= 9,15cm

En admettant l'hypothèse que la nervure ne se comporte pas comme un unique corps rigide C mais également comme un arc surbaissé (en anse de panier) constitué d'éléments distincts, il y lieu de procéder à un calcul approximatif en faisant coïncider l'arc avec un quart de l'ellipse. L'arc a une longueur de 212cm dans le couloir nord. Avec l'écartement des murs, la trajectoire de cet arc est modifiée, tout en conservant une même longueur.

Lorsque la naissance l'arc est déportée de 7cm, la clef de voûte s'abaisse de 11,6cm (Figure 140). Cette simulation nous permet de mieux appréhender la réalité du premier calcul, qui correspond assez à ce que nous pouvons vérifier sur place.

3.3.5 *Analyse de stabilité par la méthode des éléments finis*

Analyse statique linéaire et non linéaire

Des analyses statiques linéaires ont été réalisées pour les deux voûtes et non linéaires pour la voûte de l'aile nord, qui est la plus problématique. Le comportement sismique de l'ensemble n'a pas été abordé. [325]

Des relevés et des sondages ont d'abord été réalisés pour trouver les caractéristiques de la structure. Les résultats sont repris dans la

[325] LOURENÇO, P.B., *Parecer sobre a Estabilidade das Abóbadas do Claustro da Hospedaria (1º piso, alas sul e este) e antiga sala da Morgue do Convento de Cristo, Tomar*, Gabinete de Projectos Barbosa Lourenço, Lda., rapport réalisé pour l'IPPAR en 2004 (non publié).

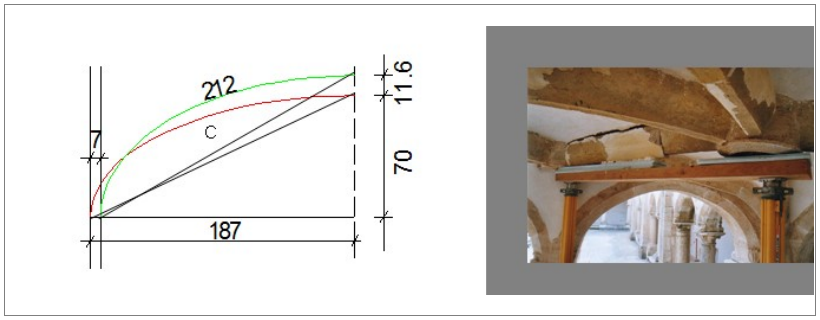


Figure 140. Affaissement de la nervure suite à l'écartement des appuis. (Breda, 2004)

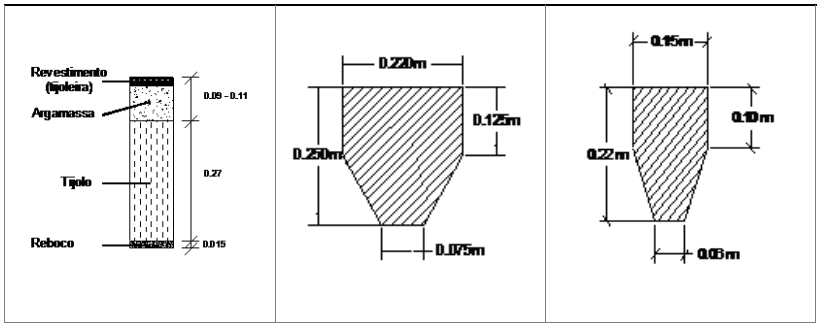


Figure 141. Sections de la voûte du cloître Hospitalier.
(a) Section de la voûte de l'aile ouest, selon l'inspection boroscopique : matériaux identifiés dans le trou et les épaisseurs correspondantes (mesures en mètre) ; (b) section-type de la nervure de la morgue ; (c) section-type de la nervure du cloître. (Lourenço, 2004)

Figure 141.

Deux modèles tridimensionnels ont été réalisés pour chaque voûte : modèle (1) sans nervures et modèle (2) à nervures. Les modèles sont composés d'éléments finis de poutre (en 3D) et forment un réseau qui représente la voûte actuelle. Chaque modèle comporte environ 2.250 éléments, 4.000 nœuds et 24.000 degrés de liberté. Les modèles de comportement et de contraintes sont identiques pour les deux modèles mais leurs conditions d'appui sont variables.

Les modèles ne tiennent compte que d'un module par aile (cf. Figure 142). Les dimensions en plan des modèles sont de 5,68m sur 3,17m (aile nord) et de 5,25m sur 2,10m (aile ouest). Écartement entre les lignes de la trame : 0,18m (transversalement) et 0,20m (longitudinalement) pour l'aile nord ; 0,21m (transversalement) et de 0,15m (longitudinalement) pour l'aile ouest. Les éléments de poutre pris en compte pour l'aile nord ont une épaisseur de 0,20m. Pour l'aile ouest, l'épaisseur adoptée est de 0,30m pour les poutres.

Contraintes et conditions d'appuis

Les contraintes prises en compte sont : les charges permanentes (G) et la surcharge d'utilisation (Q), augmentée de 1,5 kN/m^2 pour les revêtements, ainsi qu'une surcharge d'usage de 3 kN/m^2, considérée adéquate pour cette partie du couvent. Le remplissage des voûtes a été incorporé aux charges.

Le modèle numérique adopte deux conditions limites de l'appui : (a)

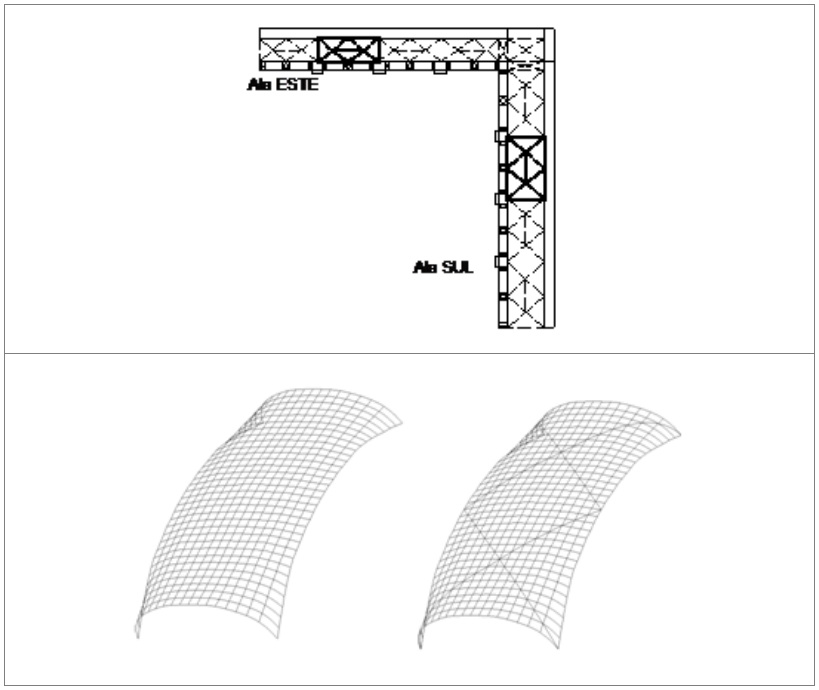


Figure 142. Modélisation des voûtes. (a) Module-type ;
(b) Modèle 1 (sans nervures) ; (c) Modèle 2 (à nervures). (Lourenço, 2004)

son intégration dans les deux murs ; (b) l'intégration dans les murs extérieurs, et les appuis élastiques horizontaux avec poutre de rebord dans les murs intérieurs. Dans ce dernier cas, le résultat obtenu pour la rigidité des ressorts horizontaux permet de simuler la rigidité des piliers et des colonnes.

En outre, pour les sommets de la voûte, on a considéré les conditions de symétrie habituelles entre modules adjacents (en empêchant les écartements dans le sens longitudinal de la voûte et les rotations autour de l'axe transversal).

Résultats chiffrés pour la voûte de l'aile nord - Analyse élastique linéaire pour les contraintes permanentes : Modèle 1 contre Modèle 2

La déformation de la voûte indique que le comportement est similaire à celui d'une voûte en berceau, à l'exception de la zone surmontant les colonnes, dont la rigidité est plus grande. Ainsi, le comportement de la voûte est essentiellement unidirectionnel et suit le sens de la plus petite portée.

Le diagramme des moments flecteurs de la poutre-type est caractéristique d'un appui encastré, avec des moments négatifs et des moments positifs à la moitié de la portée, et une contrainte qui apparaît axialement, pratiquement constante, causée par la courbure de la voûte. On observe des tensions maximales en traction et en compression de 0,21 MPa et –0.43 MPa, respectivement.

Les résultats obtenus pour le Modèle 2 (cf. Figure 143), montrent que l'influence des nervures pèse peu sur la réponse d'ensemble de la structure, avec de faibles altérations des contraintes dans la voûte. La présence de nervures rend la structure plus rigide dans son

ensemble (le déplacement maximal vertical à la moitié de la portée baisse de 0,725mm à 0,699m, soit un accroissement de la rigidité de 4%), ce qui réduit légèrement les contraintes au niveau de la voûte. D'autre part, les tensions des nervures atteignent à nouveau des valeurs maximales modérées de 0,25 MPa (en traction) et de –0,50 MPa (en compression).

Résultats chiffrés pour la voûte de l'aile nord - Analyse non-linéaire pour les contraintes permanentes et surcharge : Modèle 1

Afin d'évaluer la stabilité, une analyse non-linéaire, matérielle et géométrique a été effectuée sur le modèle sans nervures. Les contraintes appliquées sont l'action permanente (majorée de 1,35) et la surcharge (majorée de 1,5). Afin de d'obtenir une meilleure évaluation des conditions réelles d'appui, on a introduit les ressorts horizontaux et la poutre de rebord évoqués avant.

L'analyse a été réalisée avec des incréments de charge de 10% des contraintes appliquées, de référence (1,35G + 1,5Q). On atteint un facteur de charge de λ égal à 1,5. Le facteur de charge représente le rapport entre les contraintes appliquées au modèle et les contraintes de référence, étant entendu que le minimum admissible serait une valeur de λ unitaire au regard de la réglementation actuelle.

La Figure 144 reprend un graphique qui représente la variation du déplacement vertical du point central de la voûte en fonction du facteur de charge λ. On observe que la rigidité est pratiquement nulle en rupture, avec un déplacement très important (60mm).

On observe que la rupture s'accompagnée de trois lignes de rupture

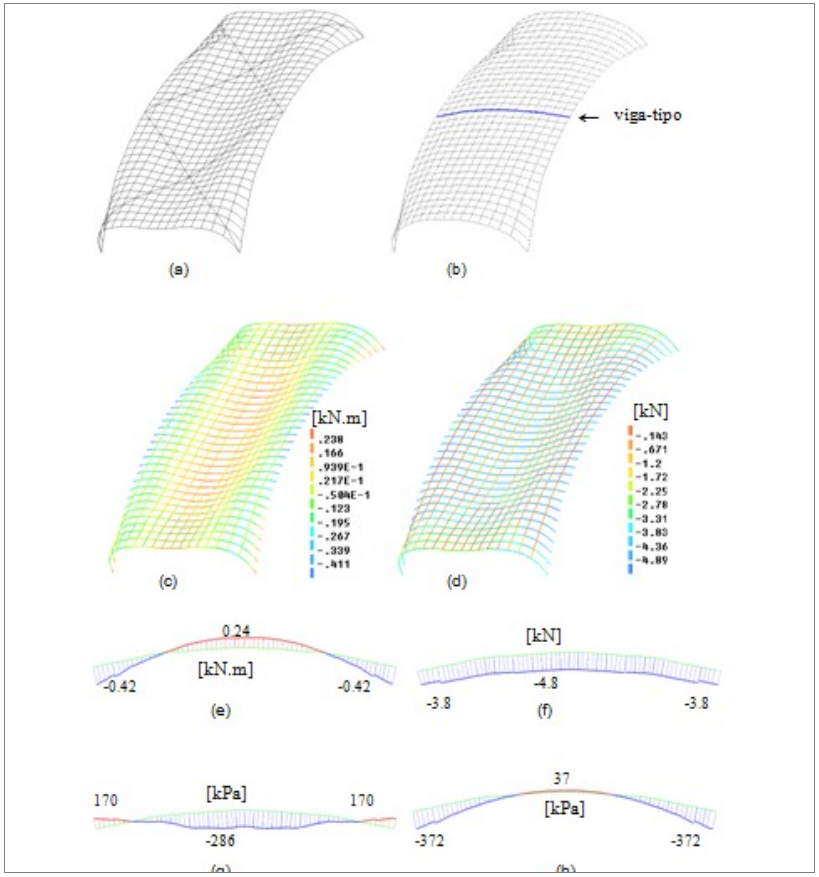


Figure 143. Résultats de l'analyse élastique du module nord. (Modèle 1 et charges permanentes) : (a) trame déformée ; (b) identification de la poutre-type ; (c) moments flecteurs ; (d) contraintes axiales ; diagramme de (e) moments flecteurs et (f) contraintes axiales sur la poutre-type ; tensions normales sur la face (g) supérieure et (h) inférieure de la poutre-type. (Lourenço, 2004)

(à mi-portée, à l'appui de l'encastrement et à proximité de l'appui du mur intérieur) et d'un déplacement horizontal important de l'appui du mur intérieur. La rupture, qui est totalement asymétrique, est conséquente des conditions d'appui considérées. On observe en outre que la distribution des contraintes aux extrémités de la voûte diffère substantiellement de celle de la zone intermédiaire, à cause de la différence de courbure, bien que le mécanisme d'effondrement soit, en pratique, unidirectionnel. Le comportement observé ne s'écarte pas substantiellement de celui d'une voûte en berceau.

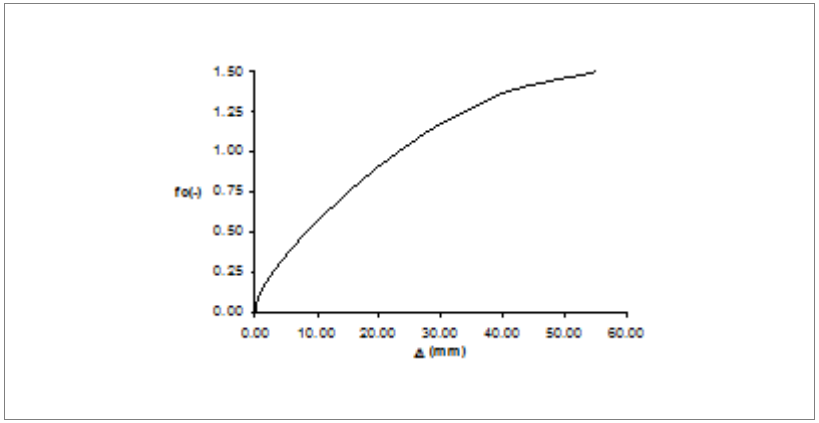


Figure 144. Rapport entre le déplacement vertical maximum de la voûte et le facteur de charge λ (Lourenço, 2004)

Résultats chiffrés pour la voûte de l'aile ouest

Seule une analyse linéaire élastique a été effectuée pour les contraintes permanentes sans nervures. On constate à nouveau que le comportement est similaire à celui d'une voûte en berceau dans la zone intermédiaire de la voûte, conséquence du rapport plus élevé entre la longueur et la portée de la voûte, à l'exception de la zone surmontant les colonnes dont la rigidité est supérieure.

Les tensions maximales en traction et en compression sont de 0,14 MPa (67% de la valeur obtenue dans l'aile nord) et –0.21 MPa (50% de la valeur obtenue dans l'aile nord), respectivement.

Conclusions

Nous concluons ces résultats pour Jerónimos par élément constructif.

- Nervures : les deux sondages par forage qui ont été réalisés montrent que la nervure courbe présente à l'extrados un queutage plus accentué que les nervures droites en plan. On en déduit que les nervures droites donnent la forme et servent d'appuis aux voussoirs, tandis que les *combados* font partie intégrante de la voûte et sont à ce titre plus proches, structurellement parlant, des voussoirs que des nervures. La structure principale du transept est composée de deux doubleaux et de six croisées d'ogives. Les

liernes et les *combados* traversent et relient ces croisées. Dans la nef, les nervures droites (tiercerons et liernes) relient les appuis en formant des triangles et des losanges qui se contrebutent. Les deux types de nervures ont la même épaisseur de 0,40m, ce qui correspond à la proportion (portée/28) des tiercerons prévue par Rodrigo Gil. Les *combados* délimitent la surface en berceau et les coupoles de plan octogonal et carré sur l'axe longitudinal. Leur localisation correspond aux zones les plus fragiles d'intersection de plans de voûtes ou de changement dans la disposition des voussoirs. Dans le transept, on retrouve les *combados* tout le long des lignes de faîte, où ils servent à relier les six croisées en empêchant les mouvements celles-ci dans le sens transversal de la voûte. Les *combados* jouent un rôle constructif et structurel dans la maçonnerie. Nous pouvons comparer les *combados* aux parpaings d'un mur.

- Voûtains : l'observation stéréoscopique et l'étude sur place ont confirmé la concavité des voussoirs et leur double courbure, qui confèrent plus de rigidité à la voûte. Chaque voûtain est comme une petite voûte. La disposition des voussoirs est habituellement concentrique par rapport aux clefs. Lors de la construction, il suffit de poser les voussoirs entre les nervures, ce qui suppose des pierres plus longues en pourtour de l'octogone (longueur moyenne de 2,50m pour les plus grandes). Les résultats des sondages au Géo Radar montrent que l'épaisseur des voûtains varie entre 0,08m et 0,10m. Dans le transept, les voussoirs sont disposés concentriquement, en particulier ceux qui sont délimités par les *combados*. Grâce à ces nervures courbes, au lieu d'avoir des coins fragilisés par des voussoirs d'angles, cette disposition concentrique renforce la maçonnerie depuis la naissance aux murs et le long des lignes faîtières.
- Clefs : la plupart des clefs de la nef et du transept sont cylindriques et taillées simplement. Dans le transept, seules les clefs des ogives et des lignes faîtières font partie des claveaux. Elles sont posées verticalement ou inclinées selon le plan de la voûte. Dans la nef, seules les clefs des formerets ont des branches en attente des liernes. Les octogones et les carrés centraux sont comparables à de grandes clefs comme on en trouve dans les voûtes anglaises où leur masse contribue à la stabilité en réduisant les forces de traction qui apparaissent dans la partie supérieure des reins. Ces coupoles suggèrent une intention de nature identique à celle de la solution anglaise dans la recherche de l'équilibre et dans l'organisation de l'espace.
- Les appuis : les tas de charge de la nef sont caractéristiques du gothique final : les nervures fusionnent, les sommiers sont horizontaux et naissent à des hauteurs différentes de manière à atteindre la hauteur de leur clef. La fusion des nervures produit des colonnes plus sveltes. À l'extérieur, les contreforts de la nef ne sont pas tous dans l'alignement des colonnes. La distribution des contraintes semble continue sur les murs, comme dans les voûtes anglaises en éventail, grâce à leur forme et au remplissage des reins qui réduisent les contraintes et transforment les poussées transversales en poussés verticales sur les appuis. Depuis

l'extrados, le radar a détecté le remplissage à environ 0,35 à 0,40m.

- Dans le transept, la solution du tas de charge des consoles semble incohérente : les nervures principales sont interrompues et les doubleaux et les ogives ne descendent pas jusqu'aux appuis, ce qui contredit l'idée du rôle structurel des nervures et qui confirme l'importance de la partie des nervures incorporée dans la maçonnerie.
- Recouvrement de la voûte : la voûte est recouverte par un blocage en maçonnerie d'une épaisseur qui varie de 0,06m à 0,14m au sommet de la voûte. L'analyse du mortier en laboratoire indique un mélange de 1:1 à la chaux aérienne, ce qui est inhabituel et caractéristique des constructions anciennes. Nous supposons donc qu'il s'agit du blocage d'origine. Cette technique est commune dans le cas de ces voûtes de faible épaisseur afin de rendre la structure plus homogène. La proportion de ce mélange de mortier donne une prise lente, idéale dans la mesure où elle permet au mortier de s'adapter aux déformations qui surviennent dans la structure après le décintrage.
- Crampons métalliques : la présence de crampons métalliques entre les douelles est signalée dans les mémoires descriptifs des travaux réalisés dans la nef et dans les métrés du transept, dans lequel on dénombrait 800 éléments à remplacer, ce qui est une quantité considérable. Nos sondages non destructifs, calibrés pour détecter des crampons métalliques, n'ont rien donné. Il faut retirer le recouvrement de l'extrados pour y accéder. Si, comme nous le croyons, le blocage de l'extrados est l'original, nous pouvons en déduire que les crampons de fer le sont également, puisqu'ils sont sous le blocage. Cela ne nous semble pas constituer une option de restauration valable. Nous pensons que, pour des raisons constructives, leur emplacement correspond aux surfaces surbaissées de la voûte. D'après le plan des archives, la plupart des interventions ont eu lieu sur l'axe transversal de la nef et aux abords de l'axe des lignes faîtières des six croisées du transept.
- Comportement structurel : les résultats du relevé des murs et des colonnes sont identiques à ceux de l'étude de stabilité par les éléments finis. Le comportement de la nef est caractéristique d'une église à trois nefs, avec une déformation de la voûte accompagnée d'un déversement des colonnes vers l'extérieur.
- L'étude de stabilité a relevé des tensions principales en traction et en compression localisées au niveau des nervures et des piliers et qui présentent des valeurs basses au niveau du remplissage. Si nous comparons ces résultats avec le registre des désordres observés, notamment le rapport qui existe entre la localisation des zones dégradées et les zones de fissures et d'écrasement prévues dans l'étude de stabilité, on ne trouve pas de coïncidentes. Les piliers au transept présentent un niveau de sécurité suffisant, tandis que celui des piliers de la nef est insuffisant.
- Nous l'avons vu, à l'époque des anciens bâtisseurs, le calcul de structure consistait essentiellement à recourir aux règles arithmétiques de proportions entre les parties et à la géométrie. La géométrie était un élément garant de la stabilité. La voûte de la nef

en est un exemple puisqu'elle présente les mêmes proportions que s'il s'agissait de voûtes en croisée d'ogives : les hauteurs des clefs centrales sont égales à la moitié de la diagonale en plan. La hauteur de la nef est égale à sa largeur. Les épaisseurs des murs de la nef et du transept correspondent à 1/10 de la portée. La hauteur du profil des tiercerons de la nef correspond à 1/28 de la portée. Pour les nervures du transept, nous n'avons pas trouvé de rapports avec les formules médiévales de dimensionnement.

En ce qui concerne la voûte du cloître de Tomar, les différentes études ont révélé des désordres structurels.

- Nervures et voûtains : les voûtes sont en briques liées au mortier de chaux. L'épaisseur minimale des voûtes est d'environ 0,35m dans le cloître. Les premiers sommiers des tas de charges sont monolithiques ; les nervures fusionnent et se séparent à des hauteurs différentes. Leur extrados est plat et elles ne sont pas intégrées dans la voûte.
- Désordres structurels : les supports des voûtes du cloître montrent des signes de déversement et d'affaissement de la construction, cause de dommages visibles dans tous les murs transversaux de l'aile nord (inclinaison des claveaux et des fissures à 45º). Des déviations verticales ont été relevées aux consoles du cloître inférieur et aux sols du premier étage. Dans l'aile nord, on trouve une plus grande concentration de pierres ayant bougé (claveaux branlants). Ce désordre n'est pas directement lié à une dégradation matérielle, car c'est aussi dans l'aile nord que les pierres, les joints et les enduits sont le mieux conservés.
- Analyse de la stabilité : le comportement structurel de la voûte du cloître est celui d'une voûte en berceau, excepté au-dessus des appuis. L'influence des nervures est peu significative pour la structure, dont la rigidité n'augmente que de 4%, soit une réduction limitée des contraintes.

Il est intéressant de comparer les résultats des deux cas d'étude de la nef de l'église du monastère de Jerónimos et du cloître hospitalier de Tomar. Bien que les matériaux de construction des voûtes soient différents, les deux ouvrages partagent la même forme en berceau.

À Tomar, où les nervures sont sur le même plan que la voûte, le rôle des nervures dans la structure est limité ; le comportement structurel est celui d'une voûte en berceau. À Jerónimos, les nervures sont incorporées dans les voûtains et les forces s'exercent surtout à ces endroits. Le comportement structurel qui en découle est celui d'une église à trois nefs.

Ces résultats indiquent que le queutage des nervures joue un rôle structurel important et influence le comportement des voûtes de par son intégration au sein de la maçonnerie. Ce n'est pas par hasard que Castilho a interrompu les nervures principales au niveau des tas de charge dans la voûte du transept, qui est pourtant de dimensions très importantes. Nous en concluons que les *combados* servent à consolider les zones fragiles d'une intersection des plans et à créer un chaînage au sein de la maçonnerie qui bloque les contraintes horizontales qui surviennent dans la structure.

4. CAS D'ETUDES. TRACÉ ET CONSTRUCTION

Introduction

Ce chapitre traite de la conception et de la construction des voûtes à nervures. Nous nous y représenterons la vision de l'architecte et nous envisagerons comment le projet a pu être conçu et comment la voûte a pu être édifiée. Le but principal était de connaître les caractéristiques de l'architecture de João de Castilho notamment et surtout de l'église de Jerónimos.

Pour atteindre cet objectif, nous avons effectué le relevé de 43 voûtes, la plupart attribuées à João de Castilho, pour analyser leur géométrie (plans en annexe). À partir de ces analyses, nous avons élaboré des hypothèses de tracé et de construction des voûtes de notre relevé. Ceci nous a permis d'identifier les caractéristiques plus particulières des voûtes attribuées à Castilho.

Nous avons pris en considération les sources et l'étude historique que nous avons présentée au premier chapitre. On part de la certitude de quelques ouvrages dont l'attribution à Castilho est documentée : la voûte du chœur de la cathédrale de Braga, la voûte du passage de la sacristie du monastère d'Alcobaça, les voûtes du monastère de Jerónimos (malgré les discussions des historiens de l'art hésitant entre Castilho et Boitaca, nous avions déjà pris parti pour Castilho depuis notre maîtrise) et les voûtes du couvent du Christ à Tomar.

Nous présentons le tracé et la construction pour chaque voûte individuellement parce qu'il existe un rapport direct entre la méthode de conception et de construction. La logique et la séquence des opérations est la même, comme nous allons voir.

Nous avons organisé les résultats par monument. Chaque monument est normalement caractérisé par une certaine typologie, surtout dans le cas de Jerónimos et du couvent du Christ à Tomar.

Les données des relevés et des analyses géométriques sont reprise en annexe. Quelques-unes des voûtes qui ont été relevées et qui sont reprises en annexe ne sont pas présentées, pour deux raisons :

- Problèmes de relevé : voûte du narthex de l'église d'Arronches et voûtes des chapelles de l'église de Vila do Conde.
- Voûtes présentant des caractéristiques très différentes de celles de João de Castilho, dans la forme et le tracé des nervures plus tardif : voûtes du chœur de l'église de Misericordia d'Arronches, chapelle de l'épître de Freixo-de-Espada-à-Cinta et de la chapelle de la nef de Vilar de Frades.

Nous présentons des voûtes que nous n'attribuons pas à Castilho, pour pouvoir comparer avec son architecture.

L'ordre de présentation des voûtes est un compromis entre l'ordre chronologique et les types de voûtes et leur complexité. Il est intéressant de vérifier que l'ordre chronologique suit à peu près l'ordre typologique.

Nous présenterons d'abord la voûte de la sacristie du monastère de Jerónimos, dont une maquette à l'échelle 1:3 a été réalisée à

l'université Polytechnique de Madrid. Nous l'avons relevée et étudiée plus en détail dans le cadre de cette thèse. Cette réalisation nous permettra d'expliquer dès le départ plusieurs détails constructifs tels que la taille des nervures, des clefs et des tas de charge, qui relève d'une méthode identique pour toutes les voûtes. Ainsi, ce cas d'étude doit être considéré comme une introduction au présent chapitre.

Dans la structure de présentation, il y a des groupes de voûtes qui se forment, notamment celui des chœurs et celui des églises-halles. Voyons l'ordre de présentation des bâtiments :

- Le groupe de voûtes de chœur : la cathédrale de Braga, la première documentée de Castilho, l'église du couvent de Jésus à Setubal et l'église de Vila do Conde, toutes avec des voûtes à *combados*, datant plus ou moins de la même époque.
- L'église du monastère de Vilar de Frades, des voûtes à liernes en forme de losanges et voûte à *combados* en forme de cercle ; la chapelle du couvent de São Francisco, à Porto, avec une voûte similaire en plan avec la voûte à *combados* de Vilar de Frades.
- Les églises-halles qui présentent une section transversale courbe entre les trois nefs : cathédrale de Viseu, églises de Freixo de Espada-à-Cinta, Arronches et Moncorvo. Nous y avons inclus les églises de Misericordia de Freixo de Espada-à-Cinta et d'Arronches, qui ont également été relevées.
- La voûte du passage à la sacristie du monastère d'Alcobaça, la voûte tournante du monastère de Batalha et celle de l'église de Marvila ; les deux premières voûtes sont des voûtes à liernes qui créent une surface plate à leur sommet, la voûte du chœur de Marvila a un sommet courbe.
- Le couvent du Christ à Tomar : bien qu'il s'agisse de la dernière œuvre de João de Castilho, nous le présentons avant Jerónimos, car les voûtes y sont moins complexes. De plus, on y retrouve la plupart des voûtes à nervures composées, ce qui permettra de mieux comprendre celle du transept de Jerónimos.
- Le monastère de Jerónimos (des voûtes les plus simples aux plus complexes) : la voûte à tiercerons de l'étage supérieur du cloître ; les voûtes à liernes en octogone (nous comparons les voûtes similaires en plan mais différentes en élévation : les voûtes nord et sud des bras du transept et celles du cloître inférieur); la voûte à liernes du réfectoire. Nous terminerons par les voûtes à *nervures composées* de la nef et du transept.

Il est intéressant de constater que Jerónimos reprend toutes les types de voûtes. Nous tirons parti de cet aspect pour simuler les hypothèses de construction en modèle 3D pour chaque type. En visualisant l'évolution constructive de chaque type de voûtes, on comprend mieux à la fois, le tracé, la construction et les différentes formes de voûtes. Nous terminerons en examinant la forme et la méthode de tracé et de construction du transept.

En annexe, nous présentons les bâtiments par ordre alphabétique, et organisés comme suit :

- La première page reprend les données de l'analyse du tracé : le

relevé (en noir, plan et élévation des nervures) et notre analyse géométrique du tracé des arcs utilisés pour la construction des nervures (en couleur). La courbe inférieure en noir indique le segment de nervure relevé par points équidistants de 0,40m (lignes verticales pointillées). On y indique normalement deux arcs de cercle : l'arc principal (p) utilisé pour la plupart des nervures et qui circonscrit le plan, et l'arc courbe de la ligne faîtière (f). (f) peut aussi être plat. L'arc principal (p) est un arc de cercle ou en anse de panier. Les données du relevé constituent par ailleurs une voie pour d'éventuelles recherches ultérieures et pour d'autres interprétations de la géométrie et du tracé des nervures. Nous avons constaté qu'un relevé peut déboucher sur plusieurs résultats. Ce fut notamment le cas avec les voûtes surbaissées, dont les premières études que nous avons effectuées avaient donné des ellipses au lieu d'arcs en anse de panier.

- La deuxième page reprend les données relatives à la construction : le plan avec la disposition des voussoirs et les sections transversales et longitudinales de la voûte ; un plan schématique des hauteurs de clefs et des dimensions des nervures ; les profils des nervures, relevés seulement en épaisseur (la largeur et les détails du profil ont été dessinés par observation).

La technique utilisée pour relever la plupart des voûtes fut des plus simples : un décamètre à ruban et un distancemètre laser LEICA. Seules les voûtes de la nef et du transept de l'église du monastère de Jerónimos, a été effectué par topographie et photogrammétrie pour la nef. La voûte du cloître hospitalier du couvent du Christ à Tomar, a également été relevée par topographie. Le relevé de la voûte du chœur de l'église de Freixo de Espada à Cinta a été effectué par la société Superfície par numérisation laser.

Malgré la simplicité de notre méthode de relevé, les résultats que nous avons obtenus étaient très corrects et parfois surprenants quant à leur correspondance avec la géométrie des points. Nous avons recouru à un distancemètre, qui s'est toutefois avéré inutile pour relever les tas de charge, puisque, positionné à l'aplomb sous ceux-ci, l'équipement ne pouvait pas faire le point sur les chapiteaux des colonnes et des consoles, pierres qui sont disposées en saillie.

Par contre, cette méthode de relevé nous a amené à tracer le plan au sol avec des cordes, dans le but de relever les nervures. Elle qui était probablement très proche de la technique utilisée à l'époque pour construire les voûtes : tendre des cordes pour tracer le plan sur la plateforme de travail. Cette méthode nous a parfois amené à comprendre la géométrie du plan, encore sur place, et l'importance de l'utilisation des cordes.

Nous avons relevé des détails constructifs, la méthode nous permettra de relever l'épaisseur des nervures. Concernant les cas du chœur de Freixo de Espada-à-Cinta et de la nef et la chapelle nord du transept de Jerónimos, nous avons pu accéder à l'intrados et nous avons relevé les largeurs et le profil des nervures.

Le plan de la disposition des voussoirs a été établi à partir de photographies, sauf pour la nef et le transept de Jerónimos, pour lesquels nous disposions des dessins photogrammétrie.

Pour chaque cas d'étude nos textes ont la structure suivante :

- Les caractéristiques générales de la voûte, les observations sur place, les données du relevé et de la géométrie disponibles en annexe ;
- Hypothèse du tracé en plan et en élévation de la voûte. Le tracé que nous présentons correspond à l'analyse géométrique du relevé. Pour chaque voûte, nous présentons des dessins du plan et l'élévation des nervures, pour un seul module. Les consoles sont désignées par la lettre M (*mísulas* en portugais), les piliers par la lettre P. Un modèle 3D complète le tracé et met en évidence les caractéristiques principales de la voûte. Parfois, il est possible qu'il y ait deux tracés, un qui a pu servir pour le projet et un autre qui est propre de la construction, qui envisageait la simplification. Ce sera le cas de la sacristie de Jerónimos.
- Hypothèse de construction. Comme pour la conception, nous tentons de reconstituer le cheminement de la construction. Des dessins présentent le profil des nervures et le plan des voussoirs, dans le cas des voûtes en pierre. Ceci concerne surtout le cintrage, l'évolution de la construction de la forme. Les détails de la taille des pierres sont explique à peine une fois pour la sacristie de Jerónimos.

Nos hypothèses de tracé et de construction des voûtes sont développées au regard des méthodes de conception et de construction contemporains à João de Castilho. Nous combinons plusieurs méthodes pour les tracées. Les hypothèses de construction et suivent la méthode indiquée par Rodrigo Gil de Hontañón.

4.1 Monastère de Jerónimos : Construction d'une voûte à nervures. Réalisation de la maquette de la sacristie.

La sacristie du monastère de Jerónimos culmine à une hauteur de 7,80 m et elle est recouverte d'une voûte à *combados*. L'espace est divisé en quatre travées rectangulaires de 8,15m sur 6,20m disposées autour d'une colonne centrale d'un diamètre de 0,66 m.

La division des travées est très discrète, grâce au surbaissement des arcs et à l'unité créée par les *combados* qui forment des quadrilobes en accolade qui surmontent les travées au même niveau. Les lignes faîtières sont courbes. Les nervures principales forment des croisées d'ogives et des étoiles à quatre branches (Figure 145).

Nos relevés (annexe A.41-43) ont montré que toutes les nervures, y compris les liernes, sont tracées selon le même arc principal centré au niveau du sol. Les deux lignes faîtières présentent la même courbure, un arc de cercle dont le rayon est le double du rayon de l'arc principal.

Les *combados* sont probablement plats, puisqu'ils relient des clefs qui sont presque à la même hauteur. En profil, les nervures diagonales, transversales et longitudinales sont les plus épaisses, avec 0,33 m. L'épaisseur des tiercerons, des formerets et des liernes est de 0,26 m et celle des *combados* est de 0,18 m. Les nervures sont tangentes au mur à leur extrados. À l'intrados, elles paraissent naître à des hauteurs différentes, un effet causé précisément par ces différences d'épaisseur.

Les clefs principales des ogives et des tiercerons sont posées à la verticale. Les clefs intermédiaires sont inclinées, détail constructif du début du 16ème siècle.

Nous avons relevé plus en détail une des travées de la sacristie. Ce relevé a débouché sur la reconstruction à l'échelle 1:3 réalisée à l'Université Polytechnique de Madrid par le professeur José Carlos Palacios Gonzalo dans le cadre d'une activité de son cours de construction gothique. Cette expérience est disponible sur



Figure 145. Voûte de la sacristie du monastère de Jerónimos.

Internet[326].

Nous présentons les hypothèses de tracé en plan et en élévation (Figure 149) et nous décrivons le processus de construction que nous avons utilisé pour construire la maquette.

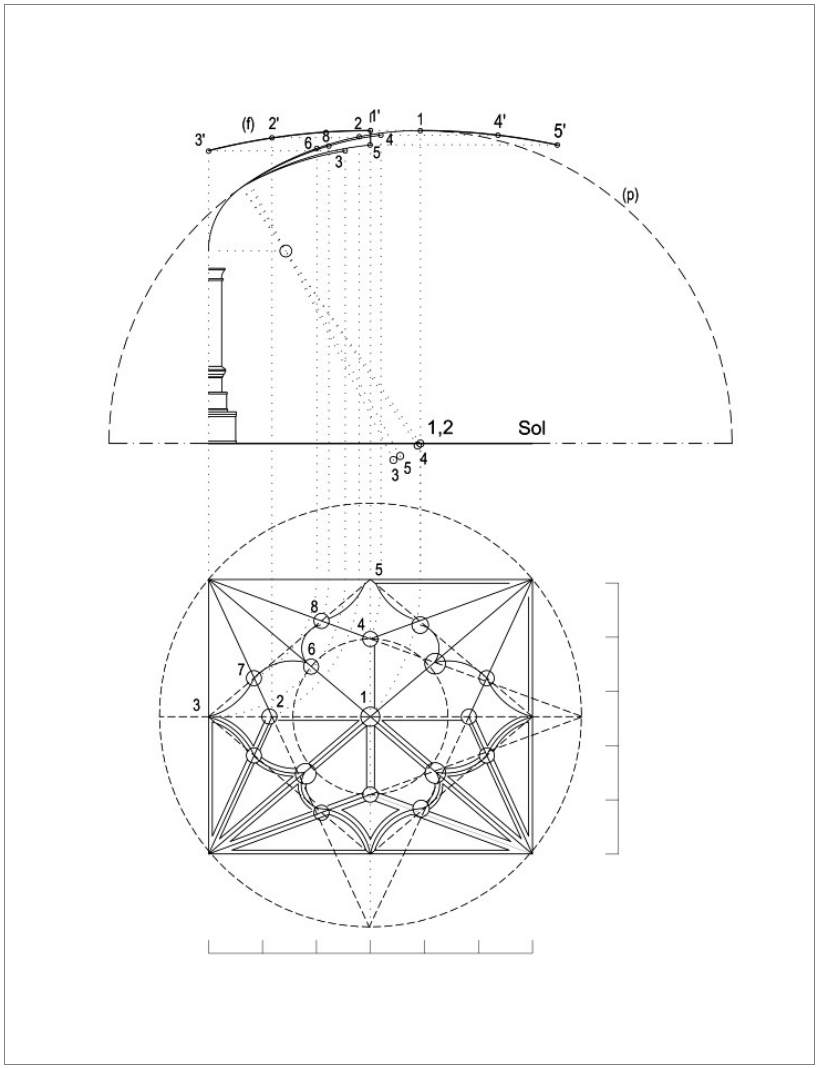
Hypothèse de tracé en plan

- On trace un rectangle de proportion 6:5 en reprenant les dimensions en plan.
- On trace les diagonales et les lignes faîtières ; les intersections donnent la clef centrale (1) et les clefs 3 et 5 des formerets et des doubleaux.
- On trace les tiercerons sur les bissectrices des arcs précédents et on pointe les clefs 2 et 4.
- On trace une circonférence passant par la clef 4 et, au croisement avec la diagonale, pointer la clef intermédiaire (6). Tracer une droite entre (3 et 5) et pointer les clefs intermédiaires (7 et 8), au croisement avec les tiercerons,
- Entre les clefs intermédiaires, on trace les *combados*.

Hypothèse de tracé en élévation

- Ogives : reprenant la longueur M-1 en plan, on trace une anse de panier dont le grand arc est centré (1) au niveau du sol et le petit arc est tangent à l'axe de la colonne ; on pointe la clef (1) sur cet arc, qui sera l'arc principal (p) utilisé pour toutes les nervures.
- Lignes faîtières : à partir de (1') on trace la faîtière longitudinale, qui est un arc de cercle dont le rayon est le double de celui de (p) ; à partir de (1), on trace l'axe transversal identique ; on pointe les clefs faîtières (2', 3' ,4' et 5') en tirant leur distance à (1) en plan.
- Tiercerons : à partir de la longueur M-2 en plan et de la hauteur (2') en élévation, on obtient la clef 2, qui est sur l'arc (p) ; à partir de la longueur M-4 et de la hauteur (4'), on obtient la clef (4) et on trace l'arc M-4 de même rayon que (p) tangentiellement au petit arc ; nous voyons que le grand arc de l'anse de panier s'abaisse pour atteindre la hauteur désirée.
- Formeret : à partir de la longueur M-3 en plan et de sa hauteur tirée de (3'), on obtient la clef (3) ; on trace l'arc M-3 de même rayon que (p) en gardant le petit arc au même niveau. La méthode est le même pour tracer M5. On observe que l'arc s'incline et garde son point de tangence sur le petit arc.
- Les méthodes que nous utilisons pour tracer l'élévation sont la méthode de Hernán Ruiz, qui consiste à tirer la hauteur à partir de la ligne faîtière et la méthode anglaise d'abaissement du grand arc de l'anse de panier qui s'incline tangentiellement au petit arc jusqu'à atteindre la hauteur de la clef. Ces deux méthodes permettent de trouver la hauteur des clefs sur la ligne faîtière. Nous insistons notamment sur la première méthode, que nous

[326] www.bovedasgoticasdecruceria.com



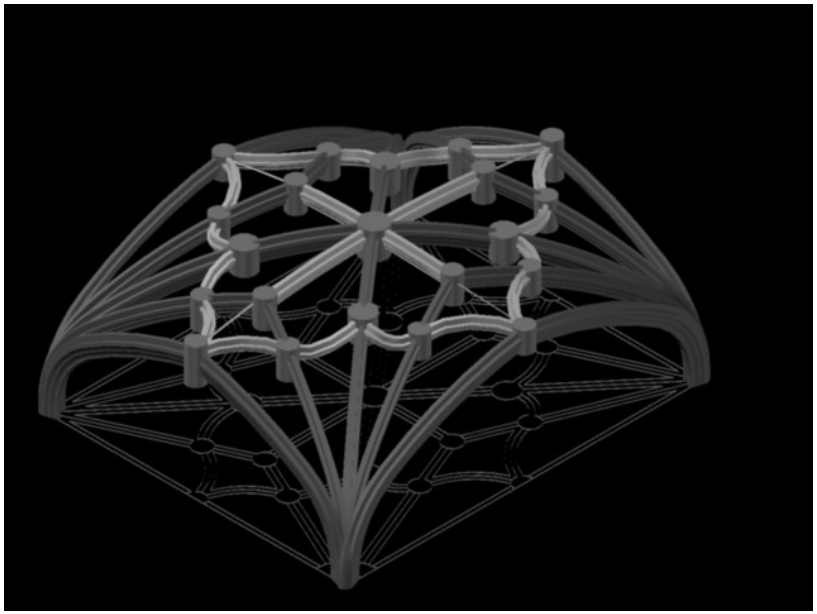


Figure 146. Hypothèse du tracé en plan et en élévation de la voûte de la sacristie du monastère de Jerónimos à Lisbonne.
En élévation, l'arc principal (p) est une anse de panier dont le centre est au niveau du sol. Les deux lignes faîtières sont identiques ; le rayon de leur arc de cercle est le double de celui de (p).

Figure 147. Dessin tridimensionnel de la voûte de la sacristie du monastère de Jerónimos à Lisbonne.
En blanc, les combados sont plats, ils relient des clefs presque à la même hauteur.

verrons dans la plupart des cas d'études.

La taille des nervures

Le processus de construction commence par le tracé de la voûte à l'échelle 1:1 sur le chantier, au sol ou sur les murs, ce qu'on appelle la *montée*.

Dans ce cas, pour réaliser la maquette, nous avons élaboré les dessins en CAD et nous les avons ensuite reproduits sur le tableau, à l'échelle 1:3. La Figure 148A montre l'ampleur de la partie supérieure de l'ovale, qui est l'arc principal, que nous avons construite.

Après avoir dessiné les arcs, on construit le biveau (Figure 148B) qui servira à tailler les claveaux (Figure 148C). Sur une des faces de la pierre, on trace l'arc de la nervure et l'angle des joints, à l'aide du biveau et on taille l'excédent. On reproduit ensuite le patron de la nervure sur les faces des joints et on taille l'excédent.

Chaque nervure possède un profil et un patron différent. Les tiercerons sont de plus petite section que les diagonales, les transversales et les longitudinales (Figure 148D.). Pour réaliser la maquette nous avons simplifié les profils en respectant toutefois les proportions (Figure 148E).

Les *combados* sont horizontales en élévation et leurs axes sont verticaux, de profil vertical. Elles sont simples à exécuter : on taille d'abord la projection horizontale courbe et ensuite le profil vertical,

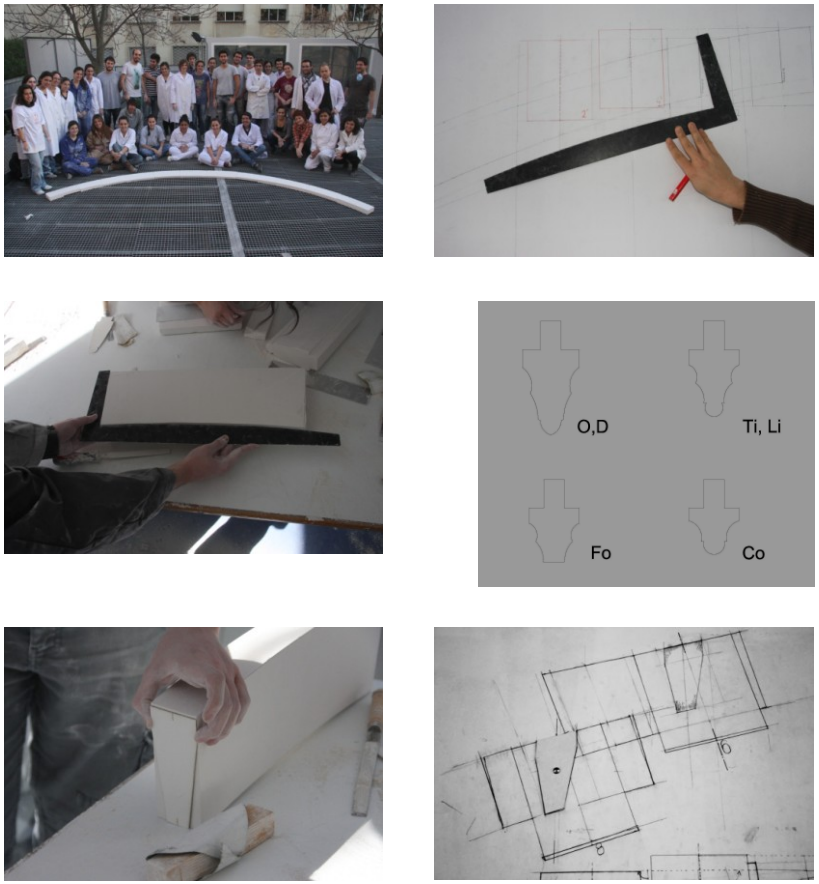


Figure 148. Méthode de taille des nervures : A, B, C, E, F (www.bovedasgoticasdecruceria.com)

comme le montre la figure (Figure 148F).

La taille des clefs

Pour tailler les clefs verticales (Figure 150A), il faut tracer leur projection horizontale et verticale à l'échelle 1:1.

À partir du modèle, on reproduit les tracés sur les faces de la pierre. On trace d'abord le plan horizontal et on extrait la pierre dans le sens vertical (Figure 149B). Ensuite, on tire les angles des bras, comme montre la Figure 149C, en prenant comme référence le plan horizontal supérieur et en reportant cet angle sur la pierre pour terminer la taille (Figure 149D).

Pour tailler les clefs inclinées, il faut faire la projection sur un plan tangent à la voûte.

La Figure 150B illustre les différentes phases : le tracé de la clef prend pour référence le plan tangent (A), la projection sur le plan tangent (B) et la clef taillée sur ce plan (C).

Bien que la clef soit inclinée, les nervures courbes restent verticales. Ce détail semble compliqué, mais à l'extrados, la nervure et la clef sont sur un même plan, ce qui facilite leur taille (Figure 151B).

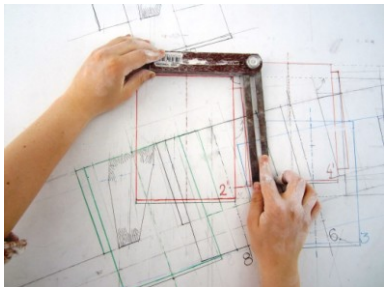
Notons que les clefs inclinées des tiercerons sont de forme cylindrique et dépourvues de branches. Elles sont donc simples à tailler. Les nervures aboutissent directement à ce cylindre. La clef est alors comme un claveau de la nervure.



A



B



C



D

Figure 149. Méthode de taille des clefs (www.bovedasgoticasdecruceria.com)

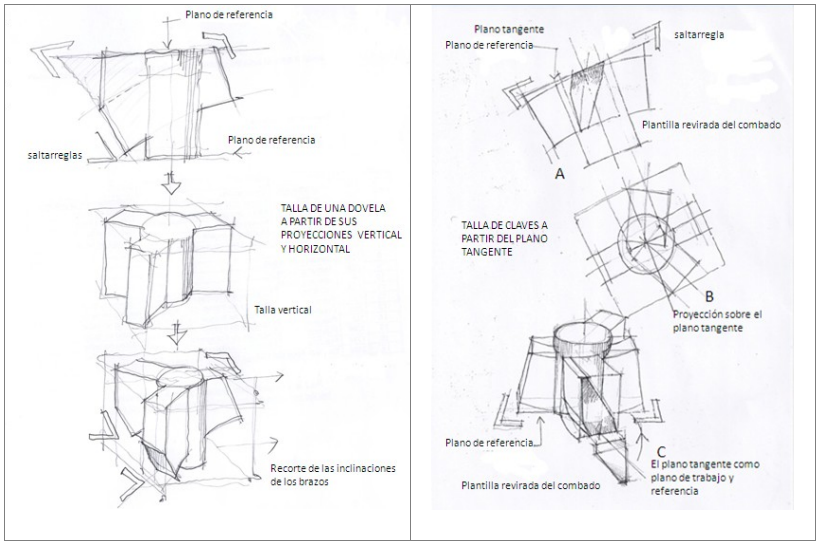


Figure 150. Méthodes de la taille des clefs verticales (A) et des clefs inclinées (B) (www.bovedasgoticasdecruceria.com)



Figure 151. A, B, Clef inclinée de la sacristie de Jerónimos

La taille des tas de charge

Au niveau des tas de charge, si on observe le détail des points de tangence des deux arcs de l'ovale (Figure 152B), on note que les différences entre les inclinaisons des diagonales et des formerets sont minimes : il suffit de tailler un sommier un peu plus incliné pour que les formerets soient en bonne position.

Les nervures ont le même petit arc au niveau du tas de charge et leur extrados est tangent au mur. À leur intrados, les nervures de moindre épaisseur recoupent la verticale plus haute. Par observation, on constate la différence de hauteur entre l'arc de la diagonale et celui du tierceron (Figure 152A).

Sur l'élévation, on divise le tas de charge en plans horizontaux jusqu'au point de tangence des deux arcs de l'ovale. Leurs projections horizontales déterminent le profil à tailler, qui servira de modèle (Figure 152C). On taille le sommier du tas de charge avec deux patrons, supérieur et inférieur (Figure 152D).

La construction de la voûte

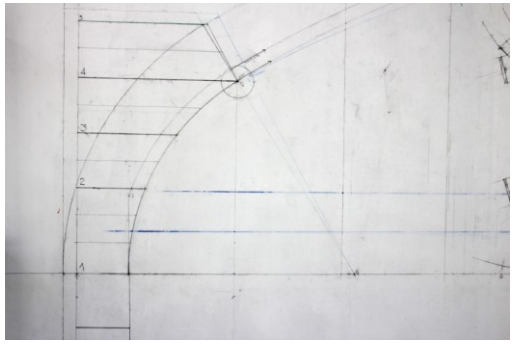
Parallèlement au travail de taille des pierres, on construit les cintres, pour supporter les claveaux. À partir du tracé effectué à l'échelle 1:1, on confectionne les patrons des cintres.

- On construit d'abord les tas de charge, qui restent en attente. On place une plateforme de travail sur laquelle on trace le plan.

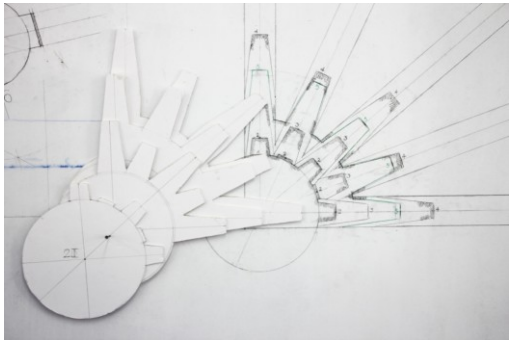
A



B



C



D



E



Figure 152. Méthodes de la taille des tas de charges (www.bovedasgoticasdecruceria.com)

Sur l'élévation, on divise le tas de charge en plans horizontaux jusqu'au point de tangence des deux arcs de l'ovale (B). Leurs projections horizontales déterminent le profil à tailler, qui servira de modèle (C). On taille le sommier du tas de charge avec deux patrons, supérieur et inférieur (D). Les nervures sont tangentes au mur à leurs extrados ; à leur intrados, les nervures de moindre épaisseur recoupent la verticale plus haute (E).

On localisera sur le plancher l'endroit où l'on dressera les étais pour poser les clefs. Comme l'explique Rodrigo Gil, ceci sera la méthode que nous irons suivre dans les cas d'études, pour les voûtes conçu à partir d'une forme détermine de ligne faîtière:

- On place d'abord les cintres de la diagonale, et l'étai de la clef 1 en alignant le fil à plomb sur l'emplacement de celle-ci sur le plancher.
- À partir de la clef (1), on place les cerces des lignes faîtières, jusqu'aux formerets et aux doubleaux ; on place les étais des clefs 3 et 5 et on place les cintres qui doivent être placés entre le tas de charge et les clefs ; les formerets prennent appui aux murs, mais il faut encore leur donner leur forme.
- On localise les clefs des tiercerons sur les cerces à l'aide d'un fil à plomb aligné vers le plancher ; on y place les étais et ensuite les cintres entre les tas de charge et les étais.
- Après avoir placé tous les cintres, on trouve l'emplacement des clefs intermédiaires des diagonales et des tiercerons en suivant la même méthode que pour les clefs précédentes.
- La structure est terminée et stable (Figure 153A). On peut poser les clefs sur les étais (Figure 153B), comme le conseille Rodrigo Gil, avant de poser les claveaux de la croisée [327]
- Après avoir mis en place les clefs principales, on pose les claveaux des nervures à partir des tas de charge. On soigne particulièrement les joints et les alignements (Figure 153C).
- Les nervures principales prennent forme, les doubleaux et formerets, les diagonales et les tiercerons (Figure 153E) Les clefs inclinées sont posées après les claveaux des nervures (Figure 153D). On place les *combados* verticalement entre les clefs intermédiaires. La construction est terminée, la voûte a acquis sa forme et les nervures serviront de support pour cintrer les voussoirs (Figure 153F).

Nous insistons ici sur le fait que les nervures principales et leurs clefs verticales sont des éléments porteurs alors que les clefs inclinées et les *combados* qui les relient sont des éléments portés.

Décintrage et analyse des résultats

La voûte est restée sur cintre pendant trois mois à l'air libre avant d'être décintrée. Au cours du décintrage, nous avons constaté que des fissures se formaient et une partie de la voûte est tombée à ce moment-là.

Nous avons réfléchi aux éventuelles raisons de l'instabilité de cette voûte lors de son décintrage, et nous en concluons deux choses :

1. Le niveau du tas de charge était trop élevé. Un niveau plus bas aurait permis de stabiliser davantage les arcs. Le niveau du tas de

[327] Simón García. 1681. *Compendio de arquitectura y simetría de los templos*, estudios introductorios de Antonio Bonet Correa y Carlos Chanfón Olmos. (facs. Ed. Colegio Oficial de Arquitectos de Valladolid 1991)


A


B


C


D


E

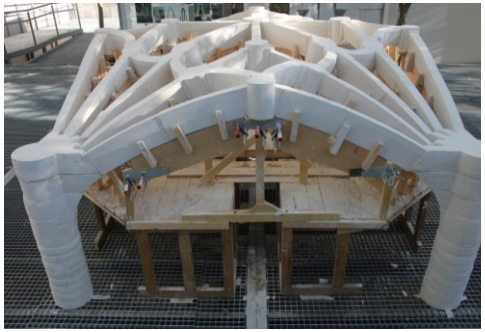

F

Figure 153. Méthode de construction de la voûte
A-pose des cintres ; B-pose des clefs principales ; C- pose des claveaux depuis les tas de charges ; D- pose des clefs intermédiaires ; E- pose des claveaux jusqu'à la clef centrale ; F – pose de combados. (www.bovedasgoticasdecruceria.com)

charge de la voûte que nous avons construite était coïncident avec le point de tangence des deux arcs. Cette méthode permet de réaliser toute la longueur des nervures en utilisant un seul biveau, c.-à-d. un seul arc de cercle, celui de plus grand rayon. Même chose pour le tas de charge, avec le petit rayon de l'ovale.

En revenant sur place, à l'église, pour relever les niveaux des joints au tas de charge, nous avons constaté que ce dernier était plus bas que celui que nous avions considéré. À partir de cette nouvelle information, nous avons émis d'autres hypothèses de géométrie. Nous avons trouvé une deuxième méthode de tracé, plus avantageuse tant pour la stabilité que pour la construction. Pour tailler les nervures, on peut utiliser un arc de cercle plus petit, de diamètre égal à la longueur de la diagonale en plan. Avec cet arc, le niveau du tas de charge est plus bas, ce qu'a confirmé notre relevé des nervures.

Notons que la construction de la voûte avec un arc plus petit est plus facile à réaliser, tant pour tracer les nervures que pour construire les cintres. Au départ, nous doutions de cette hypothèse parce que la diagonale, au lieu d'être construite avec un seul arc, se composerait de deux arcs, séparés par la clef intermédiaire. A priori, cela ne nous semblait pas logique, mais en observant le dessin présenté à la Figure 154,.nous verrons qu'il existe entre les deux tracés une toute petite différence, quasiment imperceptible à l'œil nu.

Sur place, quand on observe les arcs, il est difficile de prendre parti. On croit parfois qu'il s'agit d'un seul arc continu entre le tas de charge et la clef centrale. Parfois, on observe une petite inflexion au niveau de la clef intermédiaire. Il faudrait relever exhaustivement plus de points sur chaque nervure ainsi que les inclinaisons des joints pour confirmer cette hypothèse.

Plusieurs considérations nous amènent à prendre parti plutôt pour la deuxième hypothèse.

Dans la plupart des cas que nous étudions, l'arc standard utilisé pour la construction des nervures est décrit par un arc de cercle de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan. Cependant, certains exemples nous montrent que l'arc diagonal est composé de plusieurs segments séparés par des clefs.

Cette solution s'applique par exemple aux lignes faîtières horizontales. Une observation attentive montre que, pour la plupart des voûtes, cette ligne se décompose en plusieurs nervures courbes. Nous avons également confirmé ce point au cours de nos relevés. On verra que ces nervures présentent souvent la même courbure que l'arc principal, résultat de la standardisation des nervures. Malgré le concept de ligne faîtière horizontale, celle-ci est en réalité construite avec plusieurs segments d'arc de même courbe.

D'une part, nous avons la conception et de l'autre la construction. Il est difficile de dire où finit l'une et où commence l'autre.

Les clefs fonctionnent comme des nœuds par où il faut faire passer les nervures pour construire la voûte. Il suffit ensuite de relier ces nœuds par des segments d'arcs standards.

2. De par leur poids, les *combados* représentent un accroissement de la charge susceptible de déstabiliser la voûte. Les nervures courbes ne devraient pas être construites à ce stade. Nous avons vu, tant dans la nef de Jerónimos que dans la voûte du chœur de Freixo, dont nous parlerons plus loin, que les *combados* présentent un queutage saillant à leur extrados qui les met à la hauteur de l'extrados des voûtains. Nous en déduisons qu'ils relèvent donc plus du système des voûtains que de celui des nervures puisqu'ils sont d'une part taillés et construits comme les voussoirs et d'autre part parce qu'ils ils sont portés par les nervures droites.

Plus qu'un effet contribuant à l'unité visuelle de la voûte, les *combados*, avec leur profil incorporé dans la maçonnerie, jouent un rôle constructif et structurel. Ils permettent notamment de changer la direction des voussoirs et de disposer ceux-ci concentriquement autour de la clef centrale. Cette zone centrale gagne ainsi une forme presque de coupole. Les *combados* sont disposée dans le sens transversal des nervures (Figure 155) et fonctionnent alors comme un véritable chaînage de la maçonnerie dans la voûte, comme les boutisses d'un mur.

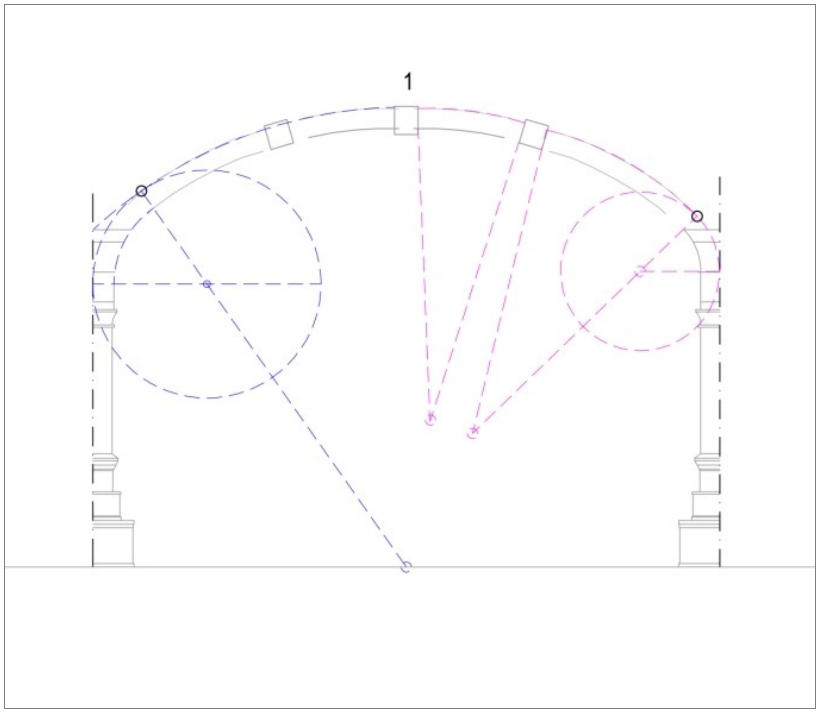


Figure 154. Deux hypothèses de tracé en élévation pour la construction de la voûte.
À gauche le centre de l'arc diagonal est au niveau du sol et correspond à la largeur de la travée en plan.
À droite, le rayon de l'arc correspond à la longueur de la demi-diagonale en plan.

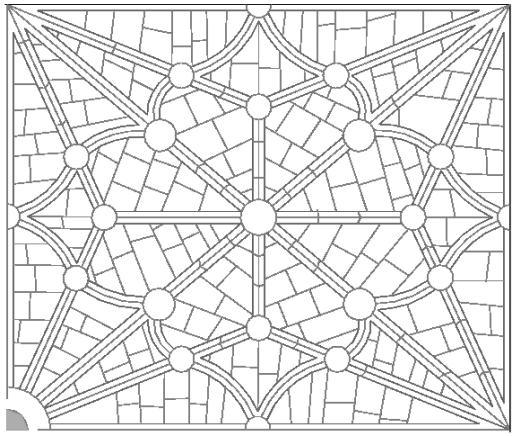


Figure 155. Plan des nervures et des voussoirs.
La disposition des voussoirs est concentrique à l'intérieur du quadrilobe, à l'exception des voûtains compris entre les doubleaux et les tiercerons. Dans ces intervalles, la disposition des voussoirs est perpendiculaire aux murs.

4.2 Cathédrale de Braga

4.2.1 *Chœur*

Le chœur de la cathédrale de Braga est composé de deux travées dont l'une présente un plan carré, et l'autre, de dimensions plus réduite, est un rectangle à coins coupés. Ses dimensions en plan sont d'environ 9,85m sur 6,80m. La hauteur sous clef de la voûte de la travée carrée est de 14,83m, contre 14,35m pour la travée rectangulaire. La console est située à une hauteur de 11,15m. Les dessins (Figure 157 et annexe A17) montrent les deux courbes des axes, longitudinal et transversal, qui définissent la forme de la voûte. Ces courbes ne sont pas aléatoires mais définissent précisément la forme arrondie destinée au sommet de la voûte.

Les *combados* se recoupent au plan formé par les diagonales et les tiercerons. Ils occupent la zone centrale et définissent deux niveaux de clefs mis en évidence en blanc dans la perspective. Le second niveau, plus élevé, forme un cercle. Les *combados* qui relient ces clefs sont plats.

Le profil des ogives et des tiercerons présente une épaisseur identique de 0,30m. Les liernes et les *combados* semblent être moins épais. Nos relevés montrent que l'élévation des nervures aurait été basée sur la circonférence circonscrite dans la travée plus petite. L'arc principal (p) qui sert à toutes les nervures, y compris les liernes, est un arc de cercle de rayon égal à la longueur M-5 en plan.

La courbure est identique pour les deux lignes faîtières et son rayon est le double de celui de (p). Ces deux lignes définissent les cotes de toutes les clefs. Toutes les clefs du cercle sont à la même hauteur que la clef 2. Les clefs 3, 4, 6, 7 et 9 sont presque à la même hauteur. C'est ainsi qu'on trouve les deux niveaux.

Toutes les nervures qui partent des consoles doivent être positionnées de manière à aboutir à ces clefs. À cette fin, elles naissent à des niveaux différents : d'abord, au niveau de la diagonale



Figure 156. Voûte du chœur de la cathédrale de Braga.
La première voûte à *combados* et documentée de João de Castilho au Portugal.

M5, naissent les nervures M3 et M4 ; ensuite, à un niveau plus élevé, les nervures M6, M7 et M9 ; plus haut encore naît la diagonale M8.

Nous remarquons que l'ogive de la grande travée n'est pas définie par un arc mais par deux. Un arc qui relie la console à (8) et un autre qui fait la liaison au centre (8-1). Notons que le recours à des nervures courbes autour de la clef centrale permet de modifier le plan du sommet de la voûte, qui, dans ce cas, produit une « coupole » centrale. Les liernes qui divisent le cercle en huit parties ont tous une courbure identique à celle des lignes faîtières.

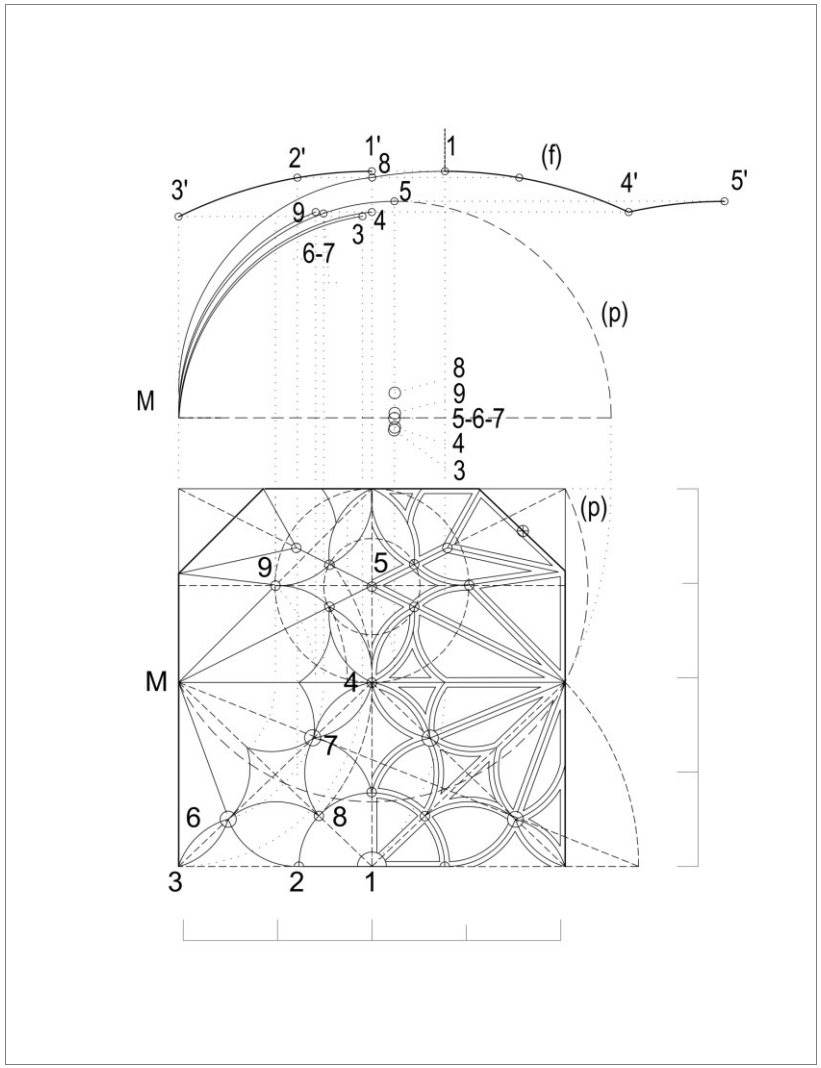
L'effet de « coupole » s'étend en dessous du cercle, malgré la différence de courbure entre la diagonale et les axes, puisque les clefs 3, 6, 7 et 4 sont sur un même niveau.

Hypothèse de tracé en plan

- On trace un carré de 6,80m de côté et un rectangle de largeur valant la moitié (3,40m).
- On trace les diagonales et les axes de la voûte ; pointer les clefs centrales 1 et 5 et celles de la transversale (4) et du formeret (3).
- On trace une droite entre les clefs 3 et 4 et la bissectrice de l'angle formé par la diagonale et la transversale ; à l'intersection des deux droites, on pointe la clef 7 ; faire de même pour l'autre demi-quart de la voûte et pointer la clef 6.
- Reprenant la distance M-4, on pointe la clef 8 sur la diagonale.
- Dans la petite travée, on trouve la clef 9 en décrivant un cercle centré sur la clef 5 et de rayon (4-5). On trouve les clefs intermédiaires des diagonales en traçant un autre cercle dont le rayon vaut la moitié de 9-5.

Hypothèse de tracé en élévation

- Ogive M5 : on trace la diagonale de la petite travée avec un arc de cercle de rayon égal à M-5 en plan et centré à la hauteur de la console. L'ogive M-5 est l'arc principal (p).
- Lignes faîtières (f) : reprenant la hauteur de la clef (5) et les distances en plan, on trace la ligne faîtière longitudinale ; on pointe les clefs 1, 4 et 5. À partir de 1, tracer la ligne faîtière transversale et pointer les clefs 2 et 3.
- Formeret et transversale : pour tracer les nervures M-3 et M-4, on reprend leur hauteur à 3' et 4' en (f), on trouve leur centre avec le rayon de (p) et on trace ensuite les arcs.
- Tiercerons : la hauteur de la clef 4 définit la hauteur des clefs 6, 7 et 9 ; on trace les tiercerons à partir de leurs longueur en plan et de la hauteur de 4' tirée de (f).
- Ogive M1 : on trace l'arc jusqu'à la clef 8 à partir de la distance M-8 en plan et de la hauteur de 2' tirée de (f) ; le lierne 1-8 a le même rayon que (f). Les nervures rayonnantes autour de la clef 1 forment une coupole.



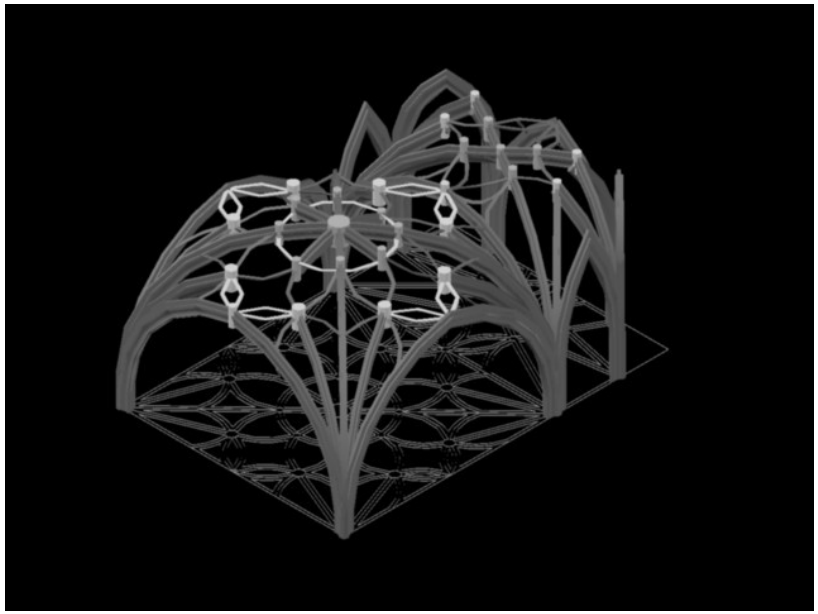


Figure 157. Hypothèse du tracé en plan et en élévation de la voûte du chœur de la cathédrale de Braga.
L'arc principal (p) est le demi-cercle de la diagonale de la petite travée, utilisé pour la construction de toutes les nervures. Les hauteurs de naissance des arcs dépendent des hauteurs des clefs, déterminées par les deux lignes faîtières (f) de même courbure. Le rayon de (f) est égal au double de celui de (p).

Figure 158. Dessin tridimensionnel du chœur de la cathédrale de Braga.
Soulignés en blanc, les *combados* qui forment deux niveaux de hauteurs de clefs.

Hypothèse de construction

Les phases de la construction suivent la séquence du tracé. Une fois achevés les tas de charge, on dispose la plateforme de travail au niveau du tas de charge. On trace d'abord le plan sur la plateforme, pour marquer l'emplacement de toutes les clefs. On dispose ensuite les cintres suivant le même ordre de tracé qu'en élévation :

- Ogive M5 : on dispose d'abord le cintre de la diagonale M5.
- Lignes faîtières : à partir de la clef 5, on dispose la cerce de la ligne faîtière longitudinale et les étais de ses clefs. À partir de la clef 1, on dispose la cerce de la ligne faîtière transversale et les étais des clefs 2 et 3.
- Tiercerons : reprenant la hauteur de 4, on dispose les étais des clefs 6, 7 et 9 ; on place les cintres des tiercerons M6, M7 et M9.
- Ogive M1 : on dispose l'étai de la clef 8 à la même hauteur que (2) et on place le cintre entre M et (8). Entre (8 et 1), on place la cerce égale à (f).
- Une fois posés tous les cintres des nervures droites en plan, on place d'abord les clefs (selon Rodrigo Gil) et ensuite les claveaux des nervures. On lance les tas de charge simultanément (pour préserver la stabilité de la voûte) en posant les claveaux, les voussoirs et en remplissant les reins.
- Quand on arrive à la clef des formerets, on pose les *combados* dans la maçonnerie en adaptant les voussoirs à cette nouvelle forme. La surface de la voûte a une forme arrondie à son sommet, qui est produite par les lignes faîtières. Les *combados* entre les formerets et les tiercerons relient des clefs à une même hauteur (premier niveau horizontal). On poursuit le remplissage les voûtains avec des *combados* en forme de pétales et des voussoirs entre eux, jusqu'au cercle au sommet. Après le cercle, on pose les voussoirs sur la forme cupulaire créée par les nervures centrales. Malgré la forme en coupole, les voussoirs sont disposés à la française, parallèlement aux axes de la voûte.

Notons que la présence des *combados* suggère une construction phasée pour chacun des deux niveaux horizontaux.

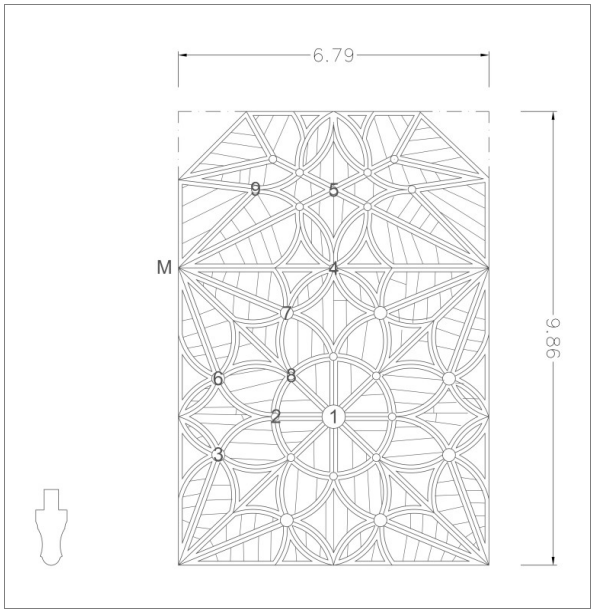


Figure 159. Plan des voussoirs et profils des nervures de la voûte du chœur la cathédrale de Braga. Le profil des ogives et des tiercerons présente une épaisseur identique de 0,30m.

4.2.2 *Porche*

Le porche de la cathédrale de Braga est recouvert de voûtes à tiercerons en étoile à quatre branches. Il se développe sur trois travées rectangulaires d'une largeur de 4,00m. La travée centrale a une longueur de 7,80m pour une hauteur de 7,70m. Les deux travées latérales ont une longueur de 4,75m pour une hauteur de 7,60m.

La voûte est plus traditionnelle que celle du chœur. Les nervures reposent sur des pilastres nervurés et deux arcs doubleaux de forte section séparent la travée centrale des travées latérales. Les nervures présentent des différences de profil et de largeur mais une épaisseur identique de 0,30m.

Nos relevés (annexe A20) indiquent que les nervures de chaque travée ont une même courbure, dont le rayon est égal à la demi-longueur de la diagonale en plan. La ligne faîtière longitudinale est une courbe (*redondo* en espagnol) composée de deux arcs de cercle. Dans le sens transversal, les lignes faîtières sont brisées.

Voyons comment tracer la voûte.

Hypothèse de tracé en plan

- On trace deux travées rectangulaires présentant les proportions suivantes : petite travée : 4:5 , et dans la grande travée, la largeur mesure la moitié de la longueur (1:2).
- On trace les deux axes de la voûte et les diagonales et on pointe

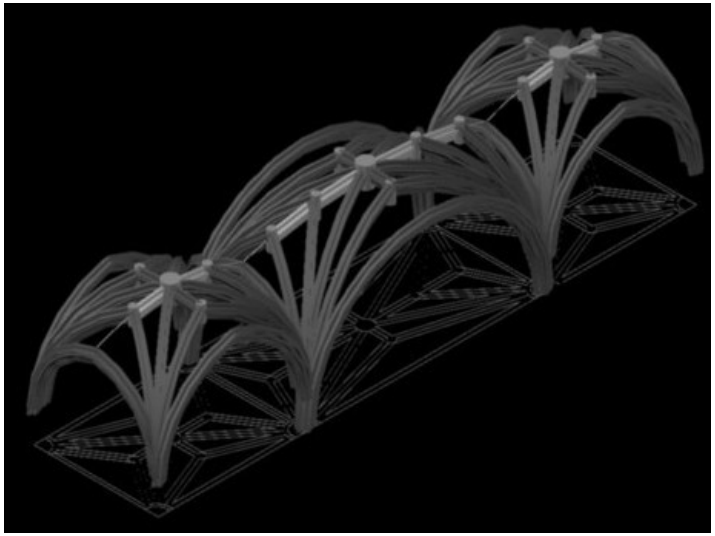


Figure 160. Dessin tridimensionnel du porche, cathédrale de Braga.



Figure 161. Voûte du porche, cathédrale de Braga.

l'emplacement des clefs centrales et latérales.

- Pour la petite travée, au centre de 6-8, on place la clef 7. Une droite passant entre la console et la clef 8 donne la clef 5. Pour la grande travée, nous n'avons pas trouvé de règle pour l'emplacement des clefs, sauf pour la clef nº 3, qui est dans le prolongement du tierceron.

Hypothèse de tracé de l'élévation

- On trace d'abord les arcs diagonaux (les ogives), égaux à (p1) pour la travée centrale et à (p2) pour la travée latérale. On pointe l'emplacement des clefs centrales 1 et 6.
- On trace la ligne faîtière longitudinale entre 1 et 6. On pointe l'emplacement des clefs qui se trouvent sur la ligne, en reprenant les distances en plan.
- On trace les nervures qui aboutissent aux clefs 2, 3, 4, 5 et 6 à partir de leurs hauteurs tirées de (f) et avec les longueurs en plan.
- Les formerets sont tracés avec des arcs différents.
- Les deux lignes faîtières transversales qui en résultent ne sont pas des arcs de cercle mais des lignes brisées.

Cette caractéristique montre que la voûte ne doit pas être attribuée à João de Castilho, puisque la hauteur n'est pas contrôlée.

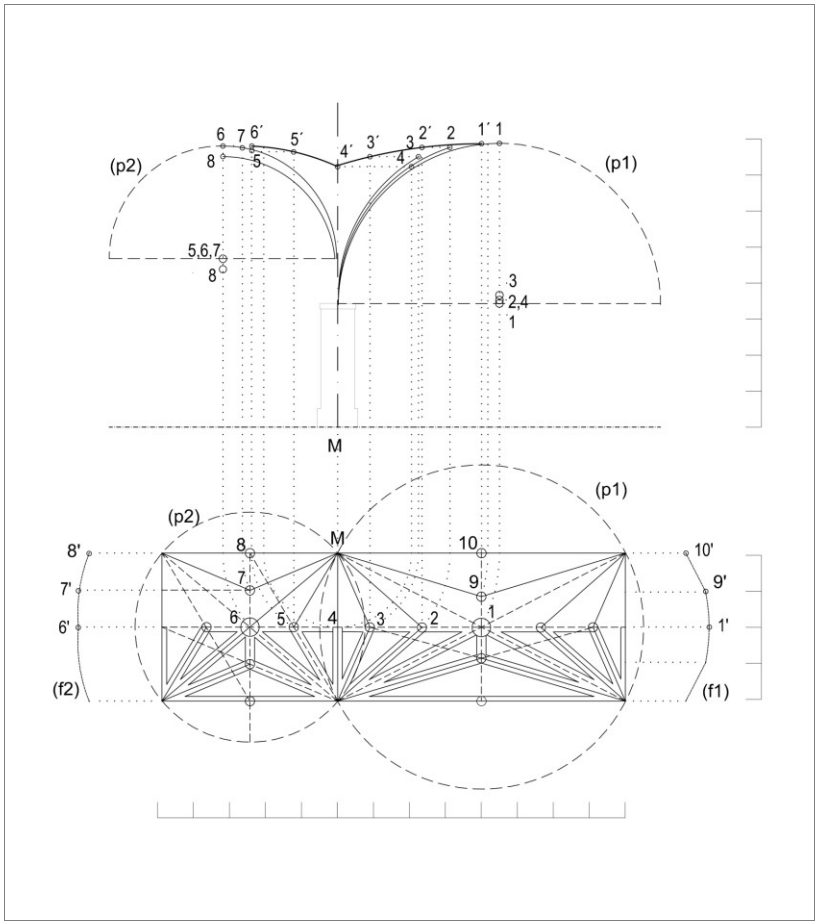


Figure 162. Hypothèse de tracé en plan et en élévation.
Deux courbures de nervure sont utilisées (p1 et p2), dont le rayon est égal à la demi-longueur de la diagonale en plan. La ligne faîtière est courbe longitudinalement et brisée transversalement.

4.3 Église du couvent de Jésus de Setúbal

4.3.1 *Chœur*

Le chœur du couvent de Jésus de Setúbal développe ses deux travées sur un plan rectangulaire de 11,80m sur 7,95m. La division entre travées est quasiment imperceptible puisqu'il n'y a pas d'arc transversal les séparant (cf. plan) et en longueur, elles sont unifiées par une courbe continue (cf. coupe longitudinale). La forme est produite par la courbe transversale et ses clefs 1 à 3, et par la courbe longitudinale et ses clefs 1, 4 et 5. La forme longitudinale courbe est sans doute volontaire dès la conception du projet afin précisément d'unifier les deux travées.

Les dessins du relevé (annexe A59-60) montrent que toutes les nervures sans exception sont construites avec le même arc de circonférence, de diamètre égal à la diagonale en plan de la plus grande travée.

Les clefs qui accompagnent les *combados* sont pratiquement toutes à la même cote. Cela signifie que les *combados* sont plats, ils sont de niveau, situation identique à celle de la cathédrale de Braga

La petite travée est également définie par la courbe de l'axe longitudinal. Celle-ci détermine les cotes des clefs 5, 9 et 10. Au sommet de cette travée, la voûte adopte la courbure de l'axe longitudinal, par rotation autour de la clef 4. Les clefs 5 et 9 sont à la même cote, alors que la clef 10 est située plus bas.

On voit clairement que la conception de la forme de la voûte a ici précédé la construction et a préalablement déterminé la ligne faîtière longitudinale.

Hypothèse de tracé en plan

Soit un espace rectangulaire de 11,80m sur 7,95m. On le divise en longueur en treize parties égales. Dix de ces parties sont affectée à la



Figure 163. Voûte du chœur du couvent de Jésus de Setúbal.

grande travée (MCEF) et trois à la petite travée (ABCM).

- Tracer les axes et les diagonales du rectangle de la grande travée et entre AD et B3. L'intersection de ces droites donne les clefs 1, 3 et 4.
- La clef 4 est le centre du rectangle (ABD3). L'intersection de la diagonale B3 avec la bissectrice M2 et avec la droite MD donne les clefs 6 et 8.
- Dans la petite travée, les clefs 5 et 9 sont situées à la même distance de 4.

Hypothèse de tracé de l'élévation

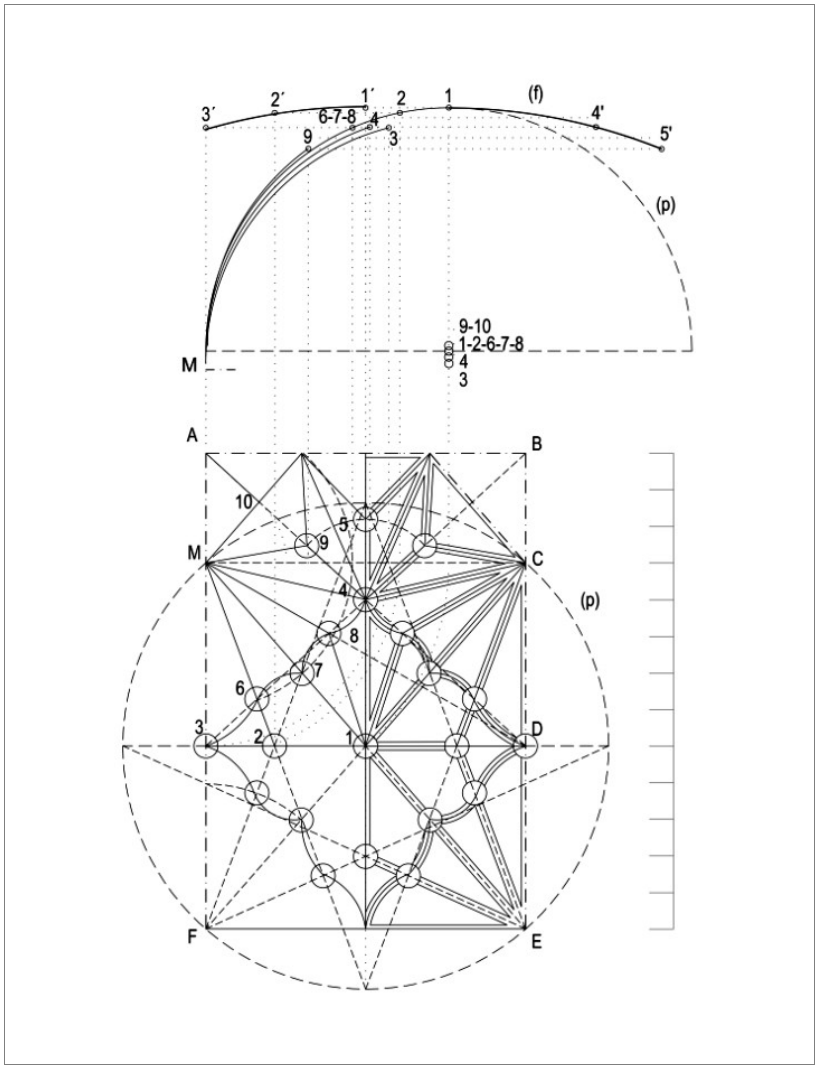
La hauteur de la voûte vaut approximativement la longueur de la diagonale BF en plan. BF est le rayon de la ligne (f) centrée à 0,40m au-dessus du sol.

- Diagonale : on trace l'ogive ME en demi-cercle, l'arc standard (p), et on pointe la clef 1.
- Lignes faîtières : à partir de 1, on trace les lignes faîtières transversale et longitudinale, avec l'ouverture de rayon BF. Les distances en plan donnent la localisation des clefs 2 sur la ligne transversale, et des clefs 4 et 5 sur la ligne longitudinale.
- Pour tracer l'élévation des nervures, il faut trouver l'emplacement de leurs clefs. On tire leurs distances en plan et leurs hauteurs des lignes faîtières. Pour tracer le tierceron M4, on cherche l'emplacement la clef 4. On reporte la distance 4-M sur le plan de l'élévation, on projette verticalement la clef jusqu'au niveau défini par 4' et on pointe la clef 4 ; à partir de 4, on trace un arc de cercle avec le rayon de (p) pour trouver le centre du tierceron, à l'intersection avec la verticale passant par 1 ; à partir du centre de 4, on trace le tierceron M4.
- On utilise la même méthode pour tracer toutes les nervures. M9 est tracé à partir de la hauteur de la clef 5, parce que les clefs 5 et 9 ont la même hauteur. Les centres des arcs changent de niveau en fonction de la hauteur de clef à atteindre et de la longueur de la nervure.
- La diagonale et les tiercerons M2 et M8 naissent sur un même niveau. Les nervures M3 et M4 sont centrées plus bas. Les clefs intermédiaires 6, 7 et 8 sont à la même hauteur que la clef 4.

Hypothèse de construction

Une fois que les tas de charge sont construits et que le plan est reproduit sur la plateforme de travail, la construction de la voûte suit de très près la méthode de tracé : on prend les hauteurs des clefs à partir des lignes faîtières.

- Diagonale : le premier cintre à être posé est celui de la diagonale. On trouve ensuite, l'emplacement de la clef 1 à l'aplomb de son emplacement sur le plancher. On place un étai de cette hauteur, qui servira à poser la clef.



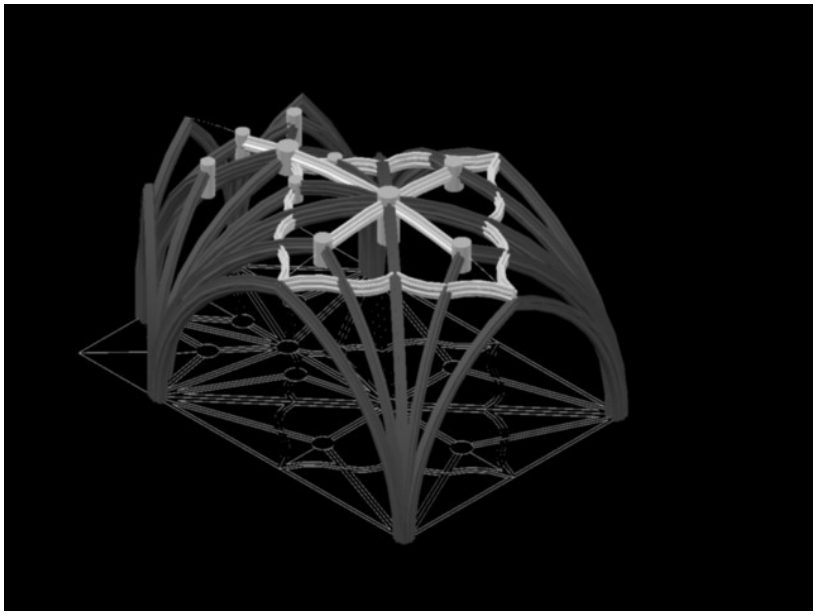


Figure 164. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du chœur du couvent de Jésus de Setúbal.
Toutes les nervures sont construites avec le même arc de circonférence, de diamètre égal à la diagonale en plan de la plus grande travée. Les deux lignes faîtières (f) sont identiques ; leur arc de cercle est centré au niveau du sol (annexe A59). Le rayon de leur arc de cercle vaut deux fois le rayon de (p). La courbe est continue longitudinalement sur les deux travées.

Figure 165. Dessin tridimensionnel de la voûte.
Soulignés en blanc, les *combados* plats, reliant des clefs à la même hauteur, et la ligne faîtière courbe unifiant les deux travées.

- Lignes faîtières : en reprenant la hauteur de la clef 1, on place les cerces des deux lignes faîtières jusqu'aux formerets, on marque l'emplacement des clefs principales 2, 3, 4 et 5 et on place des étais, comme pour 1, à l'aide d'un fil à plomb.
- Tiercerons : on place les cintres de chaque nervure jusqu'à l'étai correspondant de sa clef. À l'aplomb des clefs intermédiaires 6 et 7 marquées sur la plateforme, on trouve leurs emplacements sur les cintres. Les étais des clefs qui ne se trouvent pas sur (f), les clefs 8 et 9, ont les mêmes hauteurs que les clefs 4 et 5, respectivement.
- Pose des pierres : après la pose des cintres, on pose les clefs 1, 2, 3, 4 et 5. On pose les claveaux des nervures et les voussoirs et on remplit les reins des six consoles, simultanément afin d'assurer la stabilité de la voûte.
- *Combados* : en arrivant aux clefs des formerets et aux clefs intermédiaires, on pose les *combados* en les incorporant dans la maçonnerie du voûtain. On poursuit le remplissage des voûtains jusqu'à la clef centrale.

Comme pour Braga, on peut ici imaginer deux phases distinctes de chantier : avant et après les *combados*. Ces deux phases sont encore plus évidentes lorsqu'on observe la disposition des voussoirs, qui sont disposés concentriquement autour de la clef centrale. À la différence de la cathédrale de Braga, les liernes radiaux ne produisent pas une coupole autour de la clef centrale. À Setúbal, on retrouve presque cette même forme autour de la clef principale de la petite travée.

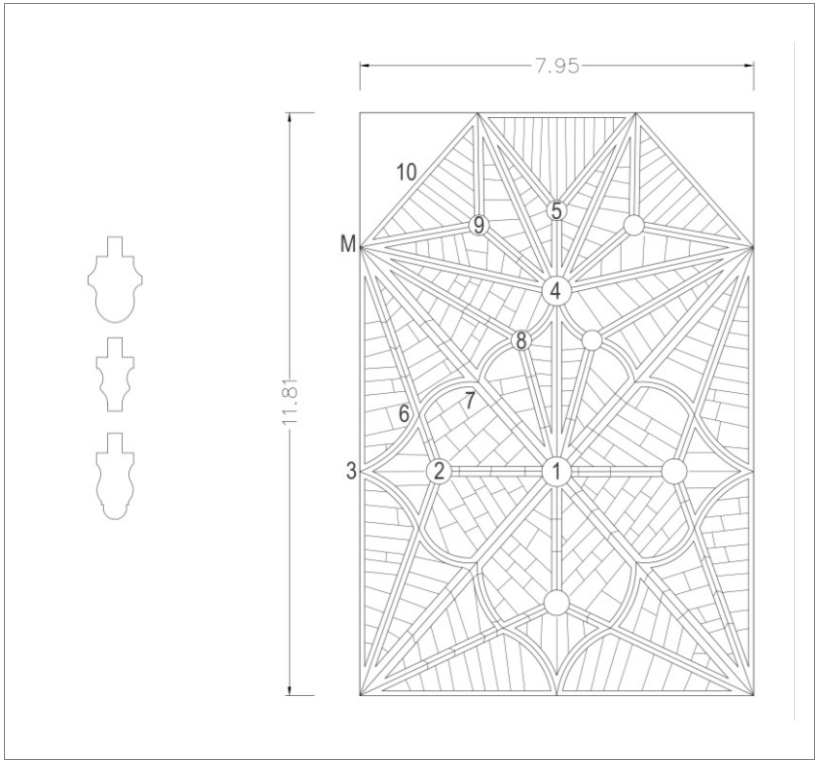


Figure 166. Plan des voussoirs et profils des nervures.
Les voussoirs sont posés entre chaque paire de nervures et ils sont concentriques par rapport aux clefs principales.
Profils des nervures et épaisseurs, à partir du haut : diagonales (0,37m); tiercerons, formerets et liernes (0,30m) ; combados (0,37m).

4.3.2 *Nef*

La nef de l'église de Jésus de Setúbal mesure 19,40m sur 10,24m et elle est divisée en quatre travées. La nef centrale est recouverte de voûtes en croisées d'ogives d'une hauteur de 13,15m. Les nefs latérales en demi-berceau ont une hauteur de 10,85m. Les arcs longitudinaux et transversaux sont larges et épais, ainsi que les arcs diagonaux.

On décèle une intention claire d'unifier l'espace de l'église transversalement et longitudinalement. Dans le sens transversal, les bas-côtés créent cette continuité par leur forme en demi-berceau. Dans le sens longitudinal, la nef et le chœur ont la même hauteur parce que la dernière travée contiguë au chœur est une demi-travée, ce qui permet d'avoir la clef de la voûte au même niveau que l'arc *triomphal* du chœur. Le regard de l'observateur est dirigé vers le chœur.

Le tracé géométrique de la voûte de la nef maintient le principe gothique. La croisée d'ogives est un arc en demi-cercle et l'arc transversal a le même rayon que celui-ci. La hauteur du demi-berceau suit aussi ce principe. La ligne faîtière transversale de la nef est un arc de cercle de rayon égal à la demi-diagonale en plan. La ligne faîtière longitudinale est horizontale.

Hypothèse de tracé de la voûte

Le tracé en plan de cette voûte est simple : il suffit de tracer des croisées d'ogives. En élévation, le berceau des nefs latérales est en demi-arc de cercle et la croisée d'ogives de la nef est un arc de cercle qui sert à tracer l'arc transversal et longitudinal.

Hypothèse de construction

La construction commence par les bas-côtés, lesquels servent à



Figure 167. Voûte de la nef de l'église de Jésus de Setúbal.

contrebuter la voûte centrale. Pour construire celle-ci, on dispose d'abord les cintres des diagonales. À partir de la clef centrale, on place les cerces des rampants qui dictent la hauteur des arcs transversaux et longitudinaux. On construit travée par travée, en réutilisant les mêmes cintres.

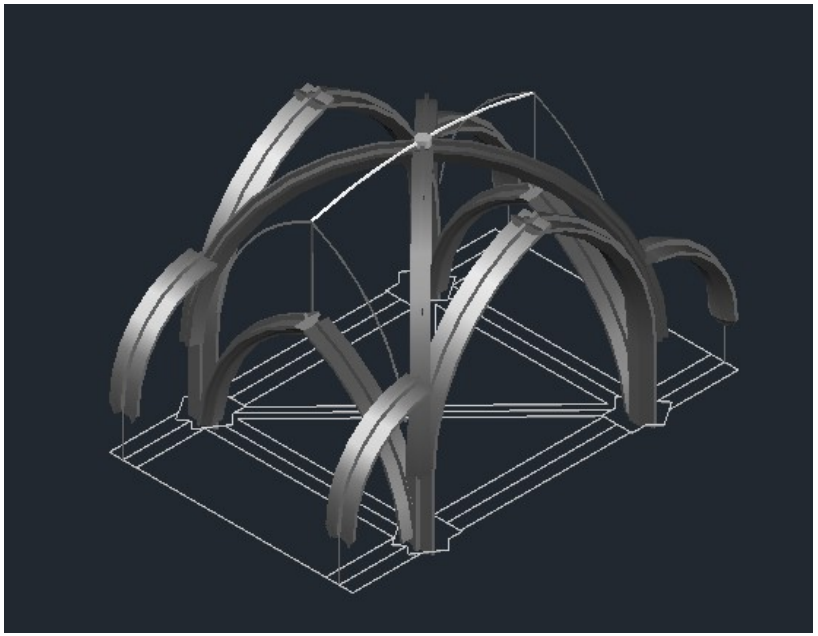


Figure 168. Dessin tridimensionnel de la voûte de la nef de l'église de Jésus de Setúbal.

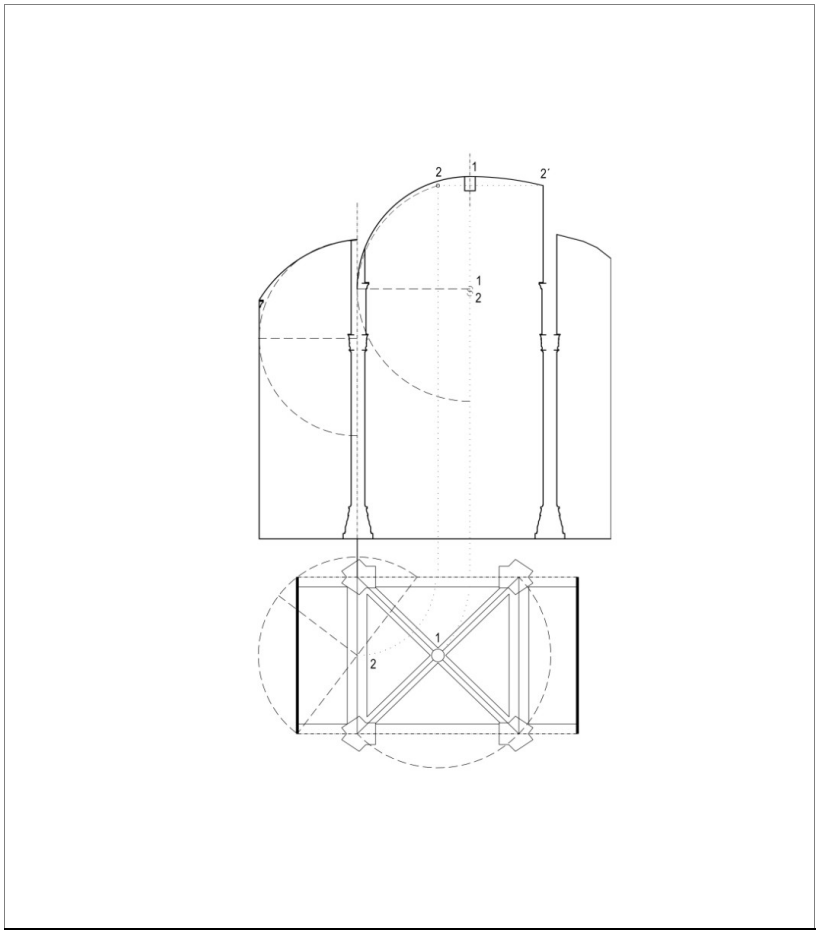


Figure 169. Hypothèse de tracé en plan et en élévation.
La hauteur des voûtes correspond à la longueur de la demi-diagonale en plan.

4.4 Église matrice de Vila do Conde

4.4.1 *Chœur*

Le chœur de l'église de São João Baptista de Vila do Conde présente un plan rectangulaire de 7,46m x 7,28m sur deux travées. À l'extérieur, les murs ont une épaisseur de 1,15m et les angles sont renforcés par des contreforts à 45º.

Chacune des deux travées a un plan de voûte distinct : la travée principale est recouverte d'une voûte à *combados* tandis que la petite travée est fermée par une voûte à tiercerons. Malgré leur différence en plan, les deux travées sont reliées par une ligne faîtière courbe en longueur, similaire à la voûte du chœur de l'église de Jesús de Setúbal.

Si cette section courbe fait penser à Castilho, d'autres caractéristiques s'écartent de son architecture, notamment le fait qu'on ne retrouve pas d'unité dans le plan des deux travées. La surface de la voûte n'est pas régulière. Les *combados* ont une forme complexe en plan et au lieu d'être horizontaux pour accentuer la continuité à la voûte, ils sont inclinés en conséquence de leur forme allongée sur l'axe transversal.

En termes d'analyse historique, notre interprétation des sources était que le chœur a été modifié par Castilho. Peut-être les comandataires ont-ils voulu conserver le plan existant de João de Rianho, premier maître d'œuvre de l'église, et que l'élévation fut faite par Castilho.

D'après nos relevés (annexe A77-78), les rapports géométriques sont les suivants : l'arc principal (p) qui sert à tracer toutes les nervures est un arc de cercle de rayon égal à la longueur en plan de M6, une branche de la diagonale de la petite travée, comme à Braga. Les deux lignes faîtières ont une même courbure, un arc de cercle, dont le centre est au niveau du sol. La hauteur de la console est égale à la longueur du plan.



Figure 170. Voûte du chœur de l'église matrice de Vila do Conde.

Hypothèse de tracé en plan

- Division des travées et localisation des clefs principales : On trace les axes longitudinaux et les transversales ainsi que les diagonales de chaque travée. On trouve les clefs 1, 3 5, 6 et 7.

- Clefs intermédiaires des lignes faîtières (f) : On trace la bissectrice de l'angle 3M1 pour trouver la clef 2 à son intersection avec 1-3. On trace une droite MA et on trouve la clef 4 à son intersection avec 1-7. On trouve la clef 11 à l'intersection de la faîtière transversale de la petite travée avec la circonférence qui circonscrit le plan de la travée principale.

- Clefs intermédiaires de l'ogive et des tiercerons : on trouve la clef 9 à l'intersection de la bissectrice tracée auparavant et la droite 3-5. À partir de 9, on trace une parallèle à la transversale et, à son intersection avec la diagonale, on trouve la clef 8. À partir de 8, une parallèle à la longitudinale donne la clef 10 à son intersection avec M4. Toutes les clefs étant trouvées, on trace l'élévation.

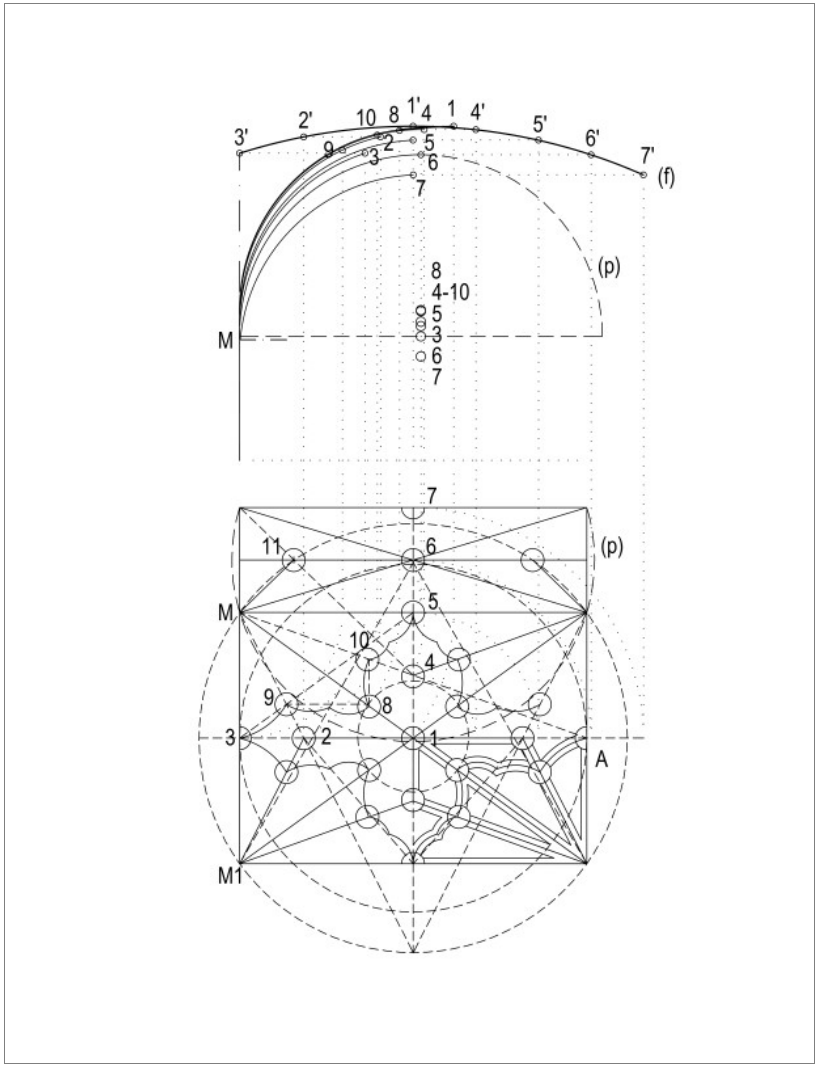
Hypothèse de tracé en élévation

- Ogive M6 et arc principal (p) : on reporte la longueur de la demi-diagonale M6 sur le plan en élévation et on projette verticalement la clef 6 jusqu'au niveau de 6' qui est situé sur (f). On marque la clef 6 et à partir d'elle, on trouve le centre de (p) en traçant un arc de cercle de rayon M6. À son intersection avec la ligne verticale qui passe par 6, on pointe le centre de (p). À partir de ce point, on peut tracer l'ogive de la petite travée, qui est l'arc principal (p). Ce rayon servira à tracer toutes les autres nervures.

- Lignes faîtières (f) et localisation des clefs principales : on trace d'abord la ligne faîtière longitudinale. Son rayon est égal à la hauteur de la voûte, dont le centre est au niveau du sol. Sur cette ligne, on pointe les clefs 1, 4, 5, 6 et 7 en reprenant les distances tirées du plan. À partir de 1, on trace la ligne faîtière transversale, de courbe identique, et on pointe les clefs 2 et 3 à partir de leurs distances en plan. Nous n'avons pas pu accéder à la clef 7 pour le relevé.

- Ogive M1 : cette nervure est composée de deux arcs. L'arc inférieur relie le tas de charge et la clef 8. L'arc supérieur relie les clefs 8 et 1. Pour la construction, il faut tracer la partie inférieure de l'arc, au tas de charge, afin de confectionner le biveau des sommiers. Pour la partie supérieure l'arc est standard et le tracé est dispensable. Pour tracer M8, on reprend sa distance tirée du plan et on projette sa clef 8 sur le plan en élévation jusqu'à la hauteur déterminée par 4'. On trouve le centre de la même manière que pour M6 et on trace l'arc de cercle M8. Entre 1 et 8, on utilise le même arc de cercle (f), ce qui produit une coupole autour de la clef centrale 1.

- Tiercerons : pour tracer les tiercerons, la méthode est la même que pour les ogives. La clef intermédiaire est projetée sur cet arc, avec sa distance jusqu'à M tirée du plan.



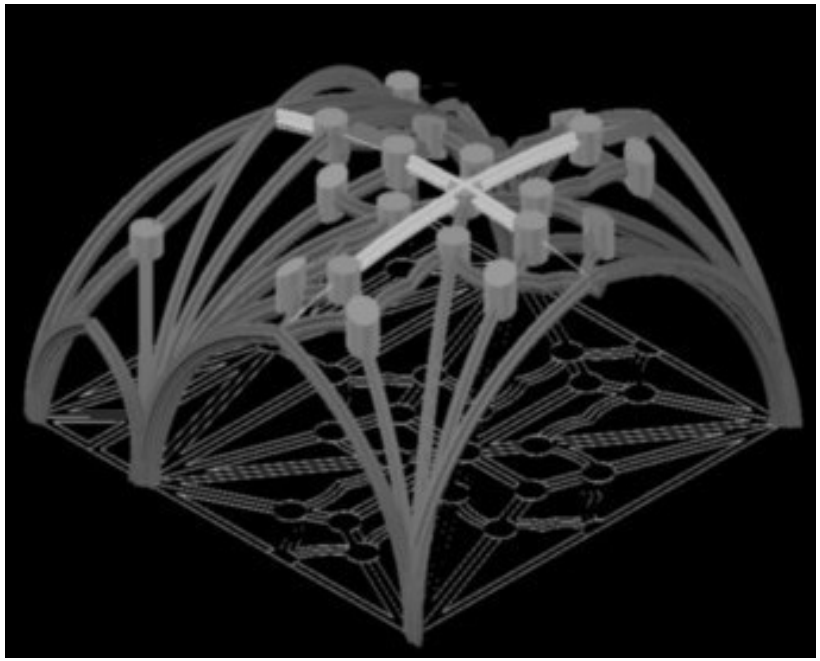


Figure 171. Hypothèse de tracé en plan et en élévation pour la voûte du chœur. L'arc principal (p) qui sert à tracer toutes les nervures est un arc de cercle de rayon égal à la longueur en plan de M6, une branche de la diagonale de la petite travée. Les deux lignes faîtières ont une même courbure, un arc de cercle, dont le centre est au niveau du sol. Comme à Setúbal, la ligne faîtière longitudinale recouvre les deux travées.

Figure 172. Dessin tridimensionnel de la voûte du chœur de l'église matrice de Vila do Conde.

Hypothèse de construction

On pose d'abord la console et les tas de charge. La hauteur de la console vaut la longueur en plan. On place les échafaudages et la plateforme de travail sur laquelle on trace le plan de la voûte. L'ordre de construction des cintres est celui du tracé de la voûte : les hauteurs des clefs sont prises directement sur les lignes faîtières.

- Ogive M6 : on place d'abord le cintre de la diagonale M6 (l'arc principal) et ensuite l'étai de la clef 6.

- Lignes faîtières : à partir de 6, on pose la cerce de la ligne faîtière longitudinale et les étais des clefs qui se situent sur la ligne (4, 5, 6 et 7) à l'aide du fil à plomb. À partir de 1, on pose la cerce de la ligne faîtière transversale et on place l'étai de la clef 2.

- Ogive M1 : reprenant la hauteur de la clef 4, on place l'étai de la clef 8. On place le cintre de M8 et, entre 8 et 1, on place une cerce de courbe (f).

- Tiercerons : on place des cintres de même courbe que (p) entre le tas de charge et les étais des clefs 2, 4 et 11. On trouve l'emplacement des étais des clefs intermédiaires à partir des cintres, au fil à plomb aligné sur le marquage des clefs sur la plateforme.

- Quand tous les cintres sont placés, on pose d'abord les clefs principales sur les lignes faîtières. On établit ensuite les claveaux des nervures, les voussoirs et le remplissage, à partir de tous les appuis simultanément. En arrivant aux formerets, on pose les *combados*, qui vont relier les clefs intermédiaires. On poursuit la pose des voussoirs jusqu'à la clef centrale.

Au niveau des détails, les nervures diffèrent quant à leurs profils mais leur épaisseur avoisine toujours les 30cm. Le profil des diagonales est le même que celui des transversales ; les profils des tiercerons sont identiques à ceux des liernes. La disposition des voussoirs est légèrement irrégulière, principalement parallèlement aux murs dans la travée principale et parfois perpendiculairement aux nervures dans la petite travée.

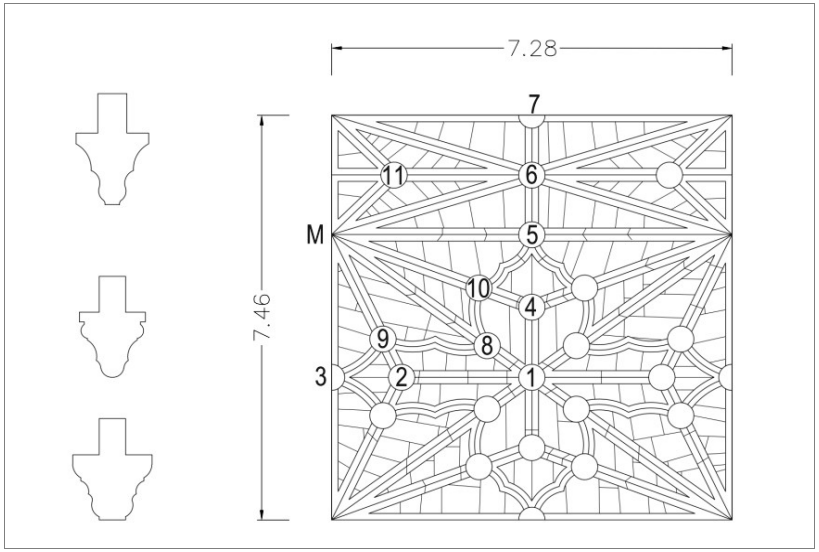


Figure 173. Plan des voussoirs et profils des nervures.
Profils des nervures et épaisseurs, de haut en bas : diagonales et transversale (0,33m); tiercerons et liernes (0,30m); formerets (0,30m).

4.4.2 *Chapelles du chœur et chapelle de la nef*

Nous avons relevé les voûtes des chapelles, mais nous n'avons pas jugé satisfaisants les résultats que nous avons obtenus : dans les deux chapelles du chœur, les points du relevé manquaient de précision et n'étaient pas assez nombreux pour effectuer l'étude géométrique de la voûte. Par ailleurs, la chapelle de la nef présente des défauts de construction et nous avons préféré ne pas la prendre comme exemple.

La chapelle de l'évangile (à gauche du chœur) présente un plan presque carré de 4,44m sur 4,17m. Elle est recouverte d'une voûte à tiercerons en étoile munie d'un oculus à l'emplacement de la clef centrale. Sa hauteur est de 7,78m et celle de la console correspond à la longueur du plan. Les nervures présentent un profil de même épaisseur (0,32m). Les ogives présentent un profil différent de celui des tiercerons et des formerets. Les voussoirs sont disposés de manière concentrique par rapport à la clef centrale.



Figure 174. Voûte de la chapelle gauche du chœur de l'église matrice de Vila do Conde.

La chapelle droite du chœur a un plan rectangulaire de 4,71m sur 4,08m. Sa voûte est à tierceron est en étoile. Les voussoirs sont disposés parallèlement aux murs.

La chapelle de droite de la nef est sur un plan presque carré de 5,36m sur 5,18m. Elle est recouverte d'une voûte à *combados*



Figure 175. Voûte de la chapelle droite du chœur de l'église matrice de Vila do Conde.

quadrilobée en accolade avec un cercle central. Les nervures présentent un profil et des dimensions similaires (0,29m d'épaisseur). Une des lignes faîtières est un arc de cercle parfait, de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan. L'autre a une forme mixte : arc de cercle au centre et horizontale vers les formerets. La diagonale semble correspondre à la courbe de rayon égal à (f) dans la partie centrale. Par conséquent, la forme du centre est une coupole. Cependant, les voussoirs qui sont perpendiculaires aux nervures au niveau des reins, au sommet de la voûte, sont disposés parallèlement aux axes de la voûte.



Figure 177. Voûte de la chapelle droite de la nef de l'église matrice de Vila do Conde.

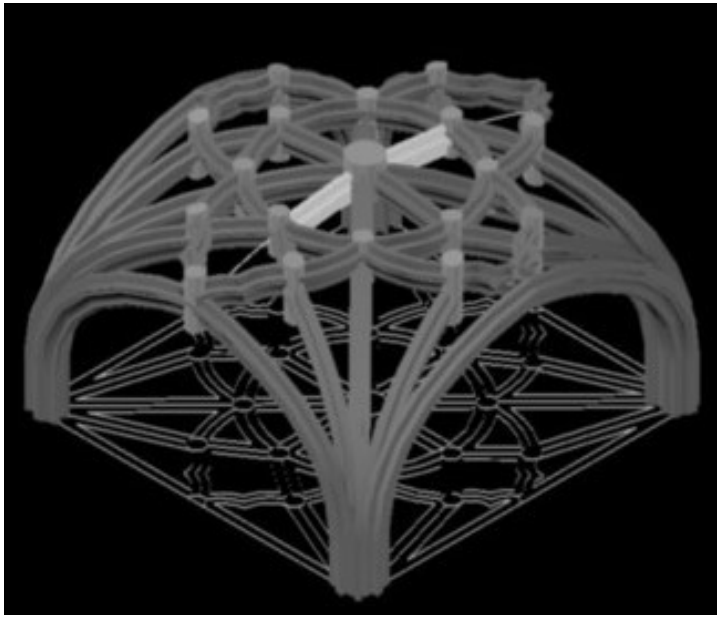


Figure 176. Dessin tridimensionnel de la voûte de la chapelle droite de la nef de l'église matrice de Vila do Conde.

4.5 Monastère de Vilar de Frades

4.5.1 *Chœur*

Le chœur de l'église du monastère de Vilar de Frades est recouvert d'une voûte à liernes sur trois travées. Plusieurs détails permettent de réaliser l'unité de la voûte. La ligne faîtière transversale est constituée d'une seule courbe continue. La ligne faîtière horizontale accentue la longueur du chœur. Les liernes en forme de losanges centraux sont reliés entre les travées par des *combados*. Les nervures présentent le même profil et dimensions (épaisseur de 0,30m).

La travée mesure 6,70m x 4,70m (une proportion proche de 3 :2) et la voûte culmine à 12,60m. La voûte repose sur des consoles placées sur les murs d'une épaisseur de 1,00m. À l'extérieur, des contreforts marquent la séparation des travées ; les contreforts placés au bout du chœur sont positionnés à 45º.

Nous avons relevé la première travée du chœur. La ligne faîtière longitudinale est légèrement courbe, vraisemblablement pour mieux faire le raccord avec l'arc *triomphal* (annexe A87-88). Cependant, nous avons constaté que la ligne faîtière longitudinale est horizontale et que les clefs des autres travées sont à la même hauteur. On notera que nous présentons ici l'hypothèse d'un tracé avec une faîtière longitudinale horizontale, ce qui est différent de ce qui est représenté en annexe.

Il y a lieu de tenir compte que la voûte actuelle a été modifiée.

Nos relevés indiquent que les nervures peuvent être tracées avec un arc de cercle de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan. La ligne faîtière transversale est un arc de cercle de rayon valant le double de cet arc précédent.



Figure 178. Voûte du chœur du monastère de Vilar de Frades.

Hypothèse de tracé en plan

- On trace les diagonales et les axes de la travée pour trouver les clefs 1, 3 et 5.
- L'intersection entre l'axe 1-5 et MA donne la clef 4. On trace une circonférence de centre 1 et de rayon 1-4 pour trouver la clef intermédiaire 6. À l'intersection d'une circonférence de rayon 1-5 avec l'axe transversal, on trouve la clef 2. On pointe l'emplacement de toutes les clefs et on trace les tiercerons.

Hypothèse de tracé en élévation

- On trace l'arc de cercle de la diagonale, de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan. On pointe la clef 1.
- À partir de la clef 1, on trace la ligne faîtière (f) de rayon le double du rayon de l'arc précédent. Sur cette ligne, on pointe les clefs 2 et 3.
- À partir de 2' et 3', on trace l'arc du tierceron M2 et du formeret M3 en reportant leurs longueurs sur le plan en élévation et en projetant verticalement les clefs. Pour tracer M4 et M5, on vise la hauteur de la clef 1. Avec le même rayon d'arc de cercle que (p), on trace toutes les nervures, dont les centres sont plus ou moins élevés en fonction de la hauteur de clefs à atteindre.

- *Hypothèse de construction*

- La méthode de construction est la même que pour les cas précédents. L'ordre de pose des cintres suit celui qui est indiqué pour le tracé en élévation. On dispose d'abord les cintres des ogives et la clef 1. On dispose la cerce des lignes faîtières et les étais des clefs secondaires et intermédiaires, à l'aide d'un fil à plomb aligné sur leurs emplacements au plancher. On monte les cintres des tiercerons entre les tas de charge et les étais. Au sommet, on place les cintres en losange.
- Une fois que la structure en bois est terminée, on pose les clefs. On pose les claveaux et les voussoirs à partir des quatre tas de charge jusqu'à la clef centrale, y compris le remplissage des reins. En arrivant au sommet, on place les *combados* entre les voussoirs. Une fois les pierres posées, on recouvre la voûte d'une fine couche de maçonnerie.

Détails constructifs

En 1697, le mur du fond a été démoli et le chœur agrandi pour faire place à un nouvel autel. Ceci a causé des problèmes structurels, dont une grande fissure longitudinale dans la voûte. Une importante campagne de reconstruction a rétabli le chœur dans sa forme originale. Les travaux ont eu lieu entre 1941-1945. On a démoli

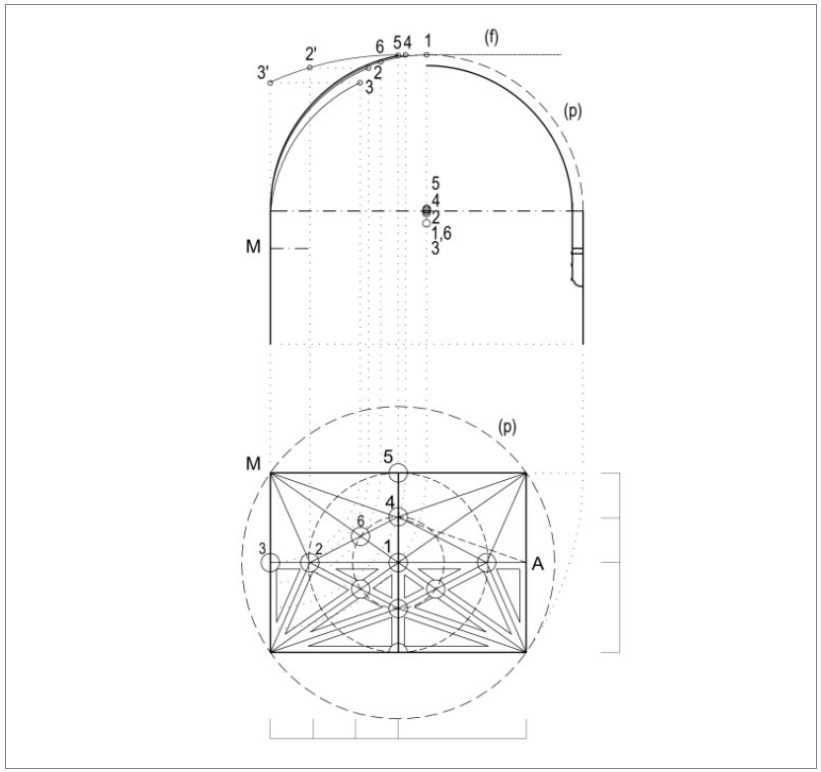


Figure 179. Hypothèse de tracé en plan et en élévation.
Les nervures sont tracées avec un arc de cercle de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan. La ligne faîtière transversale est un arc de cercle de rayon valant le double de cet arc précédent (p1).

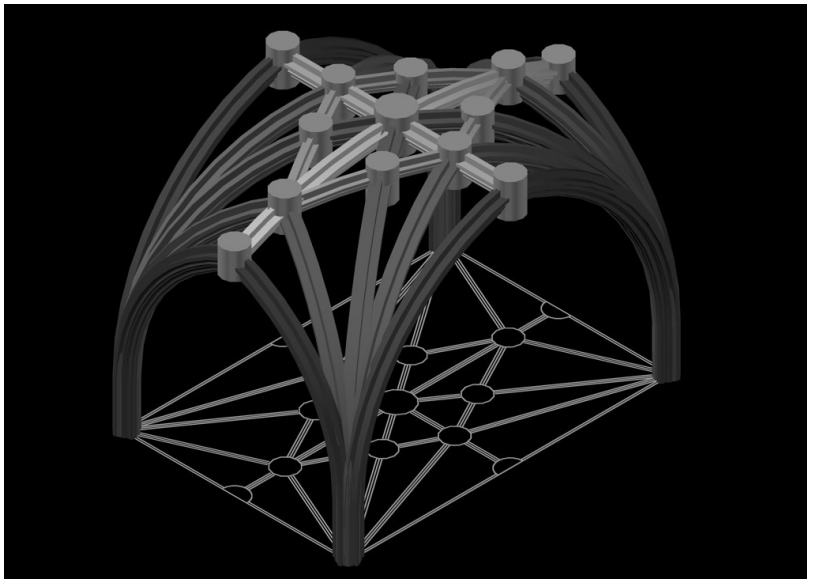


Figure 180. Dessin tridimensionnel de la voûte.

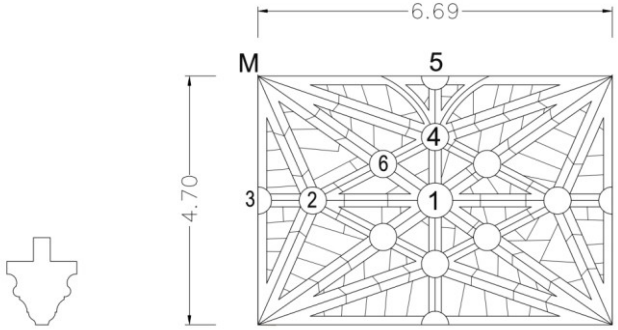


Figure 181. Plan des voussoirs et profil des nervures.
Les nervures présentent une épaisseur identique de 0,30m.

l'agrandissement et le mur du fond a été reconstruit avec des contreforts aux angles à 45º. On a enlevé tout les débris qui couvraient la voûte et elle fut complètement reconstruite. [328]Figure 182

Grâce au registre photo des travaux de 1941, nous pouvons voir des détails des nervures et des clefs. Les travaux ont compris la démolition de la dernière travée du chœur, qui semble être une construction tardive (figure…) et la remise en l'état original. La voûte semble avoir été partiellement reconstruite. Les claveaux des nervures et les clefs ont probablement été enlevés et remis en place, puisque les cintres sont numérotés, ce qui indique que des pièces préexistantes ont été remises en place.

Originalement, la voûte était probablement recouverte par une couche de maçonnerie et puis chargée de débris de matériaux de toute sorte, tel qu'on le voit à la Figure 183.

À l'extrados, il est intéressant de voir non seulement les détails des profils des nervures et des clefs mais aussi les cintres qui furent utilisés pour poser les pierres.

Les nervures ont un queutage saillant ménagé pour soutenir les voussoirs. Notons que les liernes de la ligne faîtière longitudinale confirment nos relevées, puisqu'ils sont courbes en élévation (Figure 184).

Les clefs possèdent des branches de raccordement aux nervures. Il s'agit de pièces de grandes dimensions. Sur la photo de l'intrados, nous constatons que les clefs intermédiaires sont inclinées perpendiculairement au plan de la voûte. Notons la courbe continue de la ligne faîtière transversale. Les clefs et les liernes de la ligne faîtière sont posés avant les nervures principales.

Concernant le cintrage, les liernes et les clefs de la ligne de faîte, sont posés sur une planche horizontale, séparés par des cales en bois de plusieurs hauteurs pour soutenir les clefs et les liernes de hauteurs variables. Les autres cintres, situés au croisement des tiercerons et des liernes, sont creusés aux endroits où il faut poser les clefs. Les cintres sont constitués d'une seule pièce courbe, sur laquelle on pose les claveaux. Des petites pièces en bois placées latéralement tout le long du cintre pour empêchent les mouvements horizontaux (Figure 183).

Nous pouvons voir un échafaudage partant du sol (Figure 182). Une structure similaire a dû être faite à l'époque, avec une plate forme de travail, au-dessus la console, au niveau où les nervures se séparent du tas de charge et où il faut placer les cintres des ogives et des tiercerons.

On construisait des contreforts extérieurs. Les contreforts on dû être refaits à 45º aux angles des murs, comme l'original, comme nous le constatons dans toutes les églises que nous avons relevées.

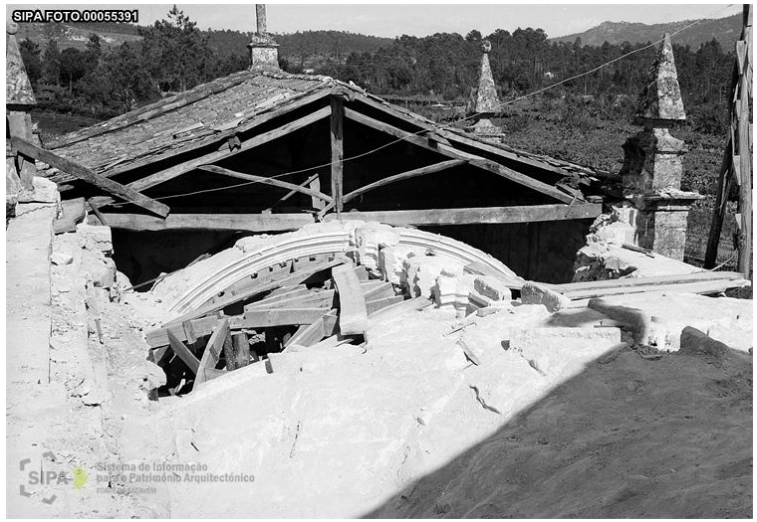
[328] VINHAS, Joaquim Alves, *A Igreja e o Convento de Vilar de Frades: das origens da Congregação dos Cónegos Seculares de São João Evangelista (Lóios) à extinção do convento, 1425-1834*, Barcelos, MC e IPPAR, 1998, pp. 168-170.



Figure 182. Échafaudage partant du sol pour la reconstruction de la voûte du chœur du monastère de Vilar de Frades.
(1941-1945 - IHRU)

Figure 183. Vue de l'extrados de la voûte du chœur montrant un arc transversal et le recouvrement de la voûte. (IHRU)

Figure 184. Cintres et liernes faîtières posés à plat sur des planchers. (IHRU)
La ligne faîtière longitudinale est constituée de liernes courbes en élévation.





4.5.2 *Croisée*

La voûte de la croisée de l'église de Vilar de Frades est une voûte à liernes en forme de losange. Comme dans le chœur, la ligne faîtière longitudinale de la croisée est une courbe de forme continue et sa transversale (qui est longitudinale par rapport au plan de l'église) est horizontale. L'unité de la voûte est accentuée par des nervures de même profil et épaisseur (0,30 m).

Toutes les nervures ont le même arc de cercle (p), dont le diamètre est égal à la longueur de la diagonale en plan. Le rayon de la ligne faîtière (f) longitudinale est le double de celui de (p). Le plan de la croisée est rectangulaire (8,96m x 4,44m), soit une proportion de 2:1. Le rapport entre la hauteur et la largeur en plan est de 3:1. La console est à 2:3 de la hauteur de la voûte (voir annexe A89-90)

Hypothèse de tracé en plan

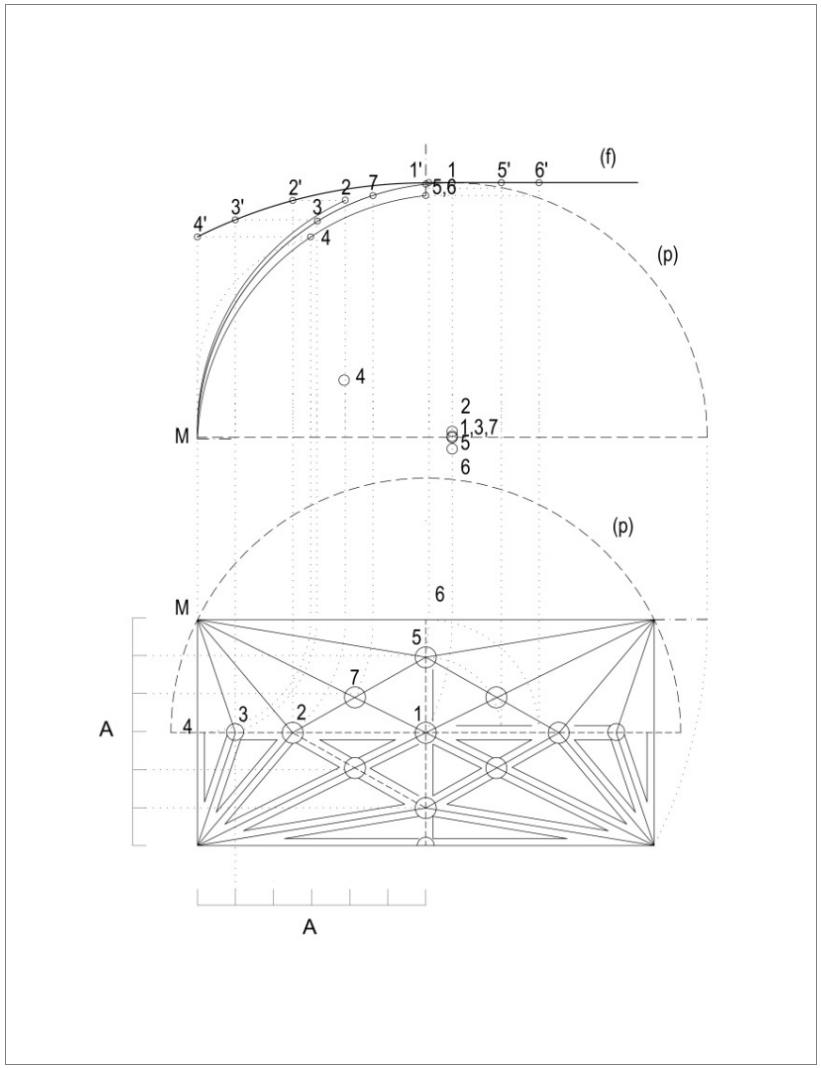
- À partir du plan rectangulaire donné, on trace les diagonales et les axes de la voûte. On pointe les clefs 1, 4 et 6.
- On divise 1-4 en six, on pointe la clef 3. On divise 1-6 en trois, on pointe la clef 5. La clef 7 est à peu près à l'intersection de la diagonale avec une circonférence de rayon 1-5. On trouve la clef 2 à l'intersection de la droite 7-5 avec l'axe transversal.
- Une fois les clefs pointées, on trace les tiercerons.

Hypothèse de tracé en élévation

- Diagonale : on trace la diagonale en demi-cercle (p), à partir de la longueur M-1 tirée du plan. La naissance de l'arc est au niveau de la console.
- Ligne faîtières : à partir de 1, on trace (f) avec le double du rayon de l'arc précédent (tracé de gauche). Sur cette courbe, on pointe les clefs 2, 3 et 4, avec les distances en plan. À partir de 1, on trace



Figure 185. Voûte de la croisée du monastère de Vilar de Frades.



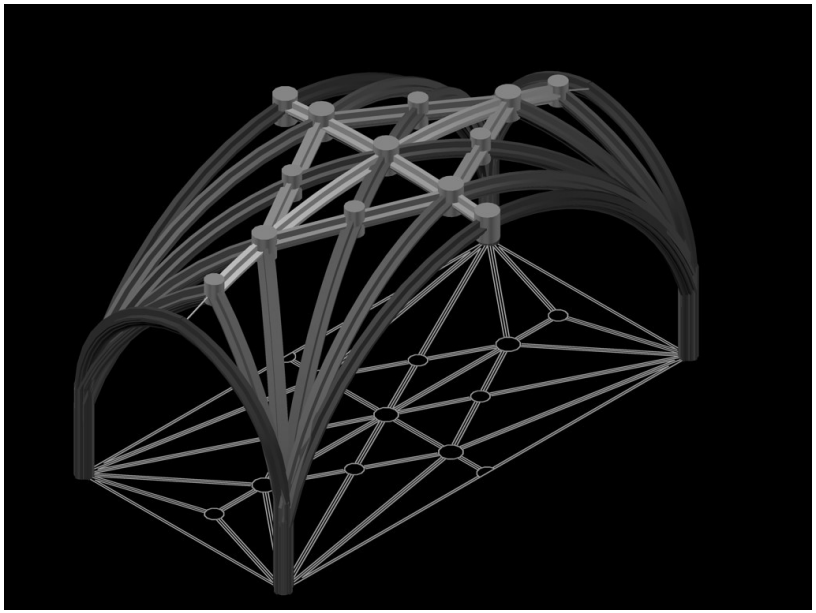


Figure 186. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la croisée du monastère de Vilar de Frades.
Toutes les nervures ont le même arc de cercle (p), dont le diamètre est égal à la longueur de la diagonale en plan. Le rayon de la ligne faîtière (f) longitudinale vaut le double du rayon de (p).

Figure 187. Dessin tridimensionnel de la voûte de la croisée du monastère de Vilar de Frades.

(f) longitudinale horizontale (tracé à droite). Sur cette ligne, on pointe les clefs 5 et 6.

- Tiercerons : reprenant les hauteurs de clefs définies sur (f), on rabat celles-ci sur le plan de l'élévation selon les distances du plan. Une fois marquées les clefs sur le plan de l'élévation, on trouve le centre de chaque nervure, avec le rayon de (p). Leurs centres se situent à des hauteurs différentes sur l'axe de la voûte, la verticale passant par la clef 1.

Hypothèse de construction

La méthode de construction de cette voûte, notamment ce qui concerne le cintrage, est identique à celle qui a été expliquée pour la voûte du chœur. Les lignes faîtières donnent les hauteurs de toutes les clefs. À partir des étais placés d'aplomb sur le plancher, on place les cintres des nervures, tous construits avec le même arc de cercle (p). Le plan des voussoirs est concentrique aux consoles sur les reins et parallèle aux lignes faîtières au sommet.

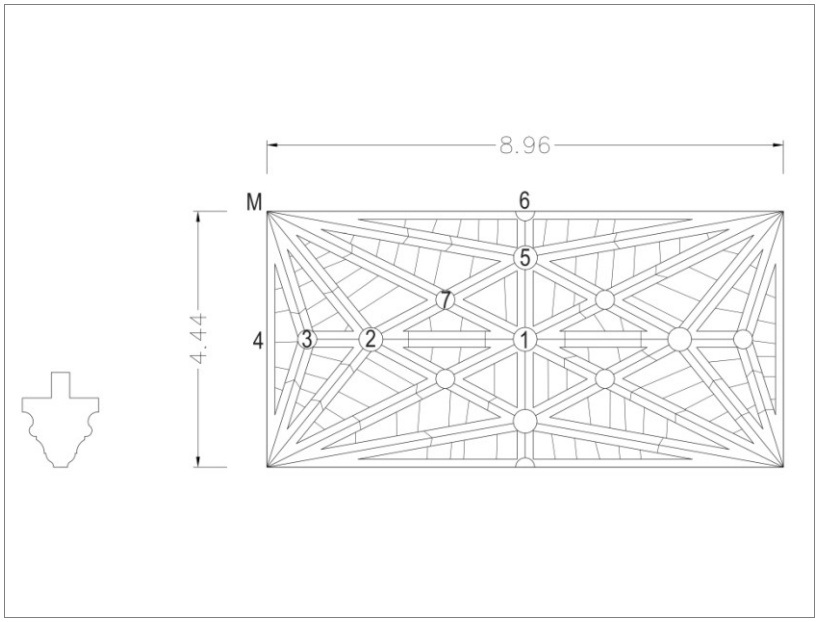


Figure 188. Plan des voussoirs et profil des nervures de la voûte de la croisée du monastère de Vilar de Frades.
Les profils des nervures sont identiques et présentent une épaisseur de 0,30m.

4.5.3 *Chapelle du transept gauche*

La voûte de la chapelle nord du transept est une voûte à *combados,* de style castillan. Les deux lignes faîtières présentent une forme courbe continue entre les formerets. Elle ressemble celle du bras sud, sauf que celle du sud est légèrement plus complexe. Outre le cercle central, d'autres *combados* forment une figure à quatre côtés convexes et une fleur à quatre pétales et d'autres figures au centre de la voûte.

Nos relevés indiquent que le plan est carré (4,41m x 4,38m). En élévation, les nervures principales sont tracées selon un arc de cercle (p) de rayon égal à la longueur des tiercerons. Les deux lignes faîtières (f) sont tracées avec le même arc de cercle de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan. La diagonale est tracée avec ces deux arcs de cercle. Cela signifie que le cercle central formé par les *combados* est à niveau et que la forme des nervures est celle d'une coupole.

Hypothèse de tracé en plan

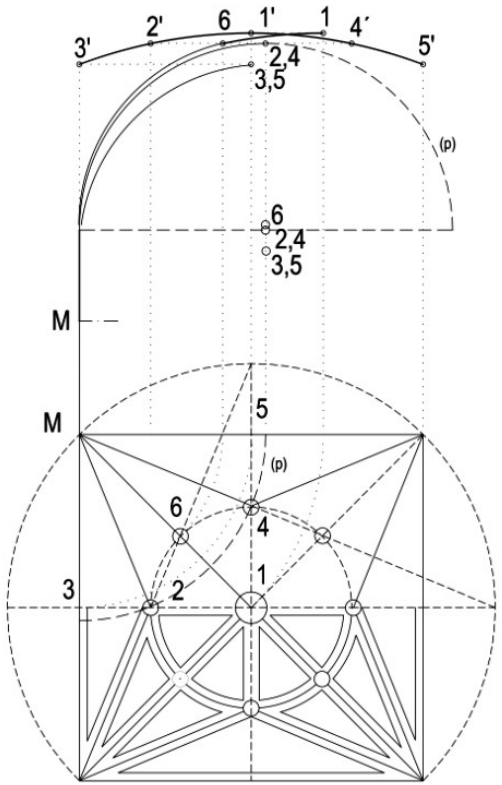
- À partir du plan carré, on trace les diagonales et les axes de la voûte. Pointer les clefs 1, 3 et 5.
- On trace des bissectrices entre les diagonales et les formerets et on trouve les clefs des tiercerons 2 et 4.
- Décrire une circonférence centrée sur la clef 1, de rayon 1-2, pour obtenir le point 6 à son intersection avec la diagonale.

Hypothèse de tracé en élévation

- Ligne faîtière (f) : une fois connue la hauteur de voûte désirée (clef 1), on trace les lignes faîtières (f), à partir de 1, de rayon égal à la de longueur de la diagonale. Sur ces deux lignes, on pointe les clefs 2 et 3.
- Tiercerons M2 et M4 (p) : pour tracer l'élévation de M2, on prend sa distance en plan, on projette verticalement la clef 2 jusqu'à la



Figure 189. Voûte de la chapelle gauche du transept du monastère de Vilar de Frades.



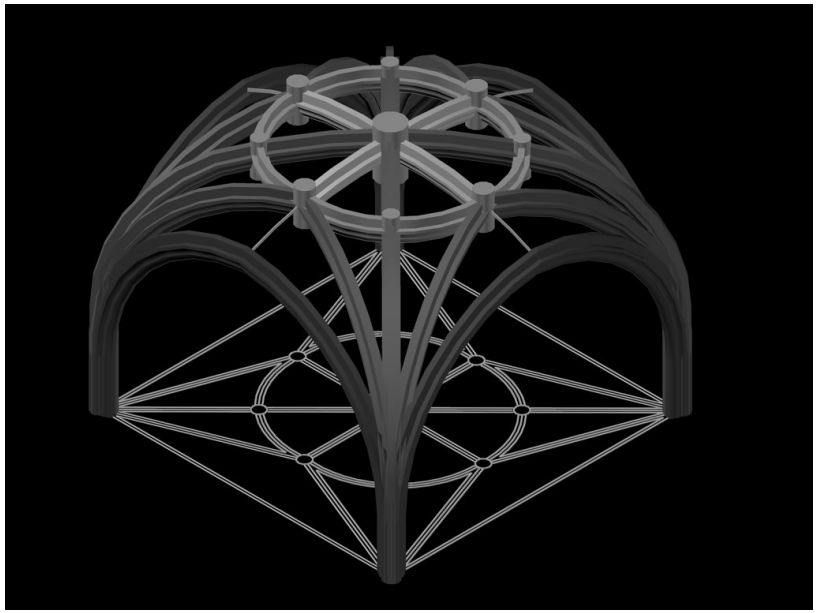


Figure 190. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la chapelle gauche du transept du monastère de Vilar de Frades.
Les nervures principales sont tracées selon un arc de cercle (p) de rayon égal à la longueur des tiercerons. Les deux lignes faîtières (f) sont tracées avec le même arc de cercle de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan. La diagonale est tracée avec ces deux arcs de cercle : les *combados* délimitent une coupole.

Figure 191. Dessin tridimensionnel de la voûte de la chapelle gauche du monastère de Vilar de Frades.

- hauteur définie par 2'. On trouve ensuite le centre de l'arc de cercle de rayon M2 et on trace la nervure. Idem pour M4, les centres sont coïncidents puisque la clef 4 est à la même hauteur que la clef 2.
- Formerets : on projette verticalement les clefs 3 et 5 et on trace leurs arcs en élévation avec la même méthode que pour les arcs précédents, dont le centre est plus bas que les arcs précédents, puisque leurs clefs sont aussi situées plus bas.
- Diagonale : on trace d'abord l'arc M6 (6 est la clef intermédiaire de la diagonale), en suivant la même procédure que pour M2 et M4 (les trois clefs 2, 4 et 6 sont à la même hauteur, condition pour que les *combados* circulaires soient horizontaux). Entre les clefs 1 et 6, on trace un arc égal à de même rayon que (f).

Hypothèse de construction

- Formerets : ces nervures n'ont pas besoin de cintre de support puisqu'elles sont construites sur le mur. Cependant, il faut leur donner la forme de (p), soit en recourant à des cintres, soit en suivant un tracé sur le mur.
- Lignes faîtières : on place d'abord l'étai de la clef centrale 1 et ensuite les cintres des lignes faîtières, transversale et longitudinale, de courbe (f), jusqu'aux formerets.
- Tiercerons : sur ces deux lignes faîtières, on trouve l'emplacement au fil à plomb les clefs 2 et 4 avec leurs étais. On place les cintres des tiercerons M2 et M4, de courbe (p).
- Diagonale : en utilisant la hauteur des clefs 2 et 4, on place l'étai de la clef intermédiaire 6, de la diagonale. On place le cintre M6 de courbe (p). Entre M6 et son opposé symétrique, on place des cintres jusqu'à la clef centrale 1 pour conclure les diagonales.
- Une fois terminé le cintrage, on pose les blocs, en commençant par les clefs et en poursuivant depuis les tas de charge jusqu'au cercle délimité par les *combados*. On pose alors les *combados* dans la maçonnerie des voûtains et on continue à remplir l'espace entre les nervures, en ajoutant des voussoirs de plus grandes dimensions qu'aux reins. Pour achever, on dresse une fine couche de maçonnerie recouvrant toute la voûte.

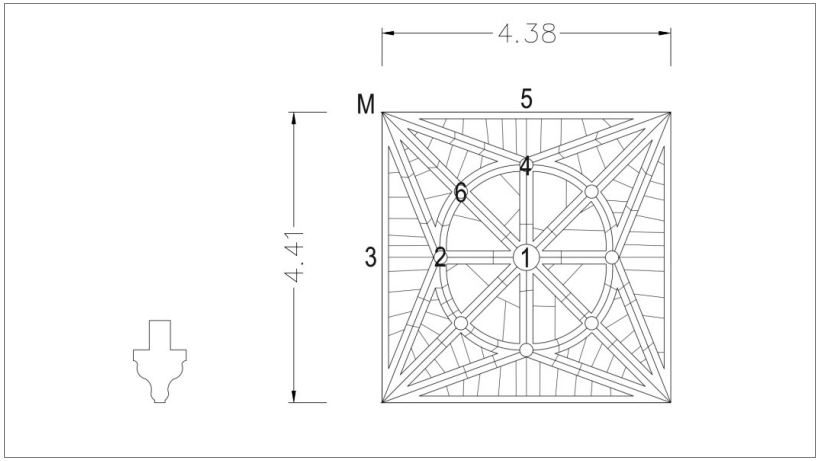


Figure 192. Plan des voussoirs de la voûte de la chapelle gauche du monastère de Vilar de Frades.
Les nervures présentent toutes le même profil et épaisseur (0,20m).

4.5.4 *Nef*

La nef du monastère de Vilar de Frades est recouverte d'une voûte à liernes en forme de losange central, composée de six travées. Les nervures principales – des ogives et trois tiercerons - partent de hautes consoles placées aux murs et accentuent la verticalité de la voûte. Les six travées sont unifiées dans le sens longitudinal par une ligne faîtière horizontale (Figure 193).

La voûte de la nef ressemble à la voûte du chœur, mais on remarque une différence qui écarte l'attribution à Castilho. La ligne faîtière transversale de cette voûte est brisée et n'est donc pas un arc continu entre les murs. Sur place, on observe les tas de charge, dont les nervures démarrent toutes au même niveau.

Nos relevés (annexe A85-86) confirment l'observation sur place, les centres des arcs qui forment les nervures sont tous à la même hauteur. Les arcs présentent tous la même courbure de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan. L'ogive est en demi-cercle. Les nervures présentent toutes les mêmes dimensions et profil (0,30m en épaisseur).

Les clefs sont verticales, sauf les clefs intermédiaires des diagonales, qui suivent l'inclinaison des claveaux. La plupart des clefs ont des branches

Hypothèse de tracé en plan

- On trace le plan de la travée rectangulaire (8,90m x 4,86m), de proportions 11:6.
- Ogives et lignes faîtières : On trace les diagonales et les axes, longitudinalement et transversalement ; leur points de convergence sont les clefs 1, 4 et 6.
- Tiercerons : On divise la largeur en 6 et au 1/6ème, on pointe la clef 5. On divise la longueur en 11 parts et au 3/11 ^{ème}, on pointe la clef



Figure 193. Voûte de la nef du monastère de Vilar de Frades.

2. Entre 4 et 2, on pointe la clef mitoyenne 3. On trace les tiercerons M2, M3 et M5.

- Liernes : On dessine le losange depuis les clefs situées sur les axes et on trouve leurs clefs intermédiaires (7) aux croisements avec la diagonale. Toutes les nervures et clefs sont trouvées ainsi.

Hypothèse de tracé en élévation

- On définit les hauteurs principales : la console est à 10,46m (1/13ème par rapport au plan) et le centre de la voûte est à plus 5m (1/6ème).
- Ogives (p) : on prend la longueur de M1 en plan, on projette verticalement la clef 1 et on trace un arc de cercle de rayon égal à M1.
- Transversales et tiercerons : l'arc transversal et les tiercerons ont le même tracé que la diagonale ; sur la figure, on voit que leurs centres sont coïncidents. Il suffit de projeter verticalement les différentes clefs sur (p).
- Lignes faîtières (f) : si nous traçons maintenant les lignes faîtières à partir des hauteurs des clefs des nervures, nous constatons que la faîtière longitudinale est presque horizontale et que la transversale est presque courbe. La longitudinale est horizontale en conséquence de la faible différence de longueur des nervures qui y convergent. La faîtière transversale, au contraire, a une forme brisée à cause des différences importantes dans les longueurs des

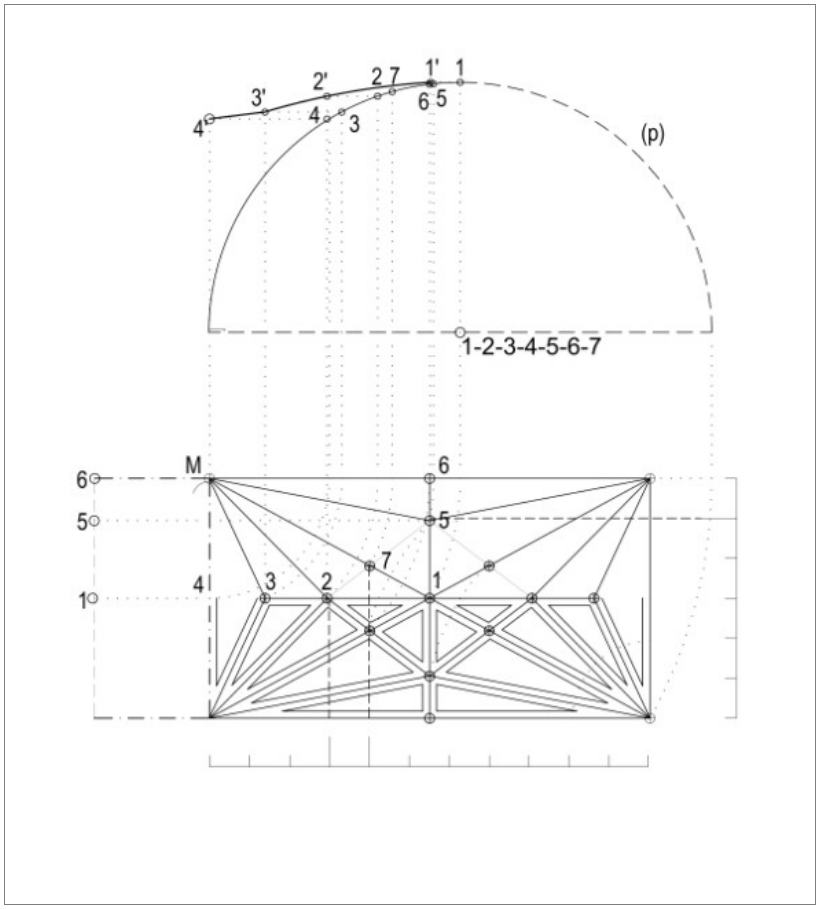


Figure 194. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la nef du monastère de Vilar de Frades.
Les arcs présentent tous la même courbure de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan. La ligne faîtière transversale est brisée.

nervures ; sa forme n'est pas un arc de cercle, elle est brisée.

La forme de la voûte résulte d'un mode de construction des nervures par simple rotation des cintres sur la plateforme de travail, à un même niveau. La forme n'est pas déterminée préalablement.

Nous venons de voir un tracé traditionnel qu'on retrouve dans plusieurs voûtes gothiques. Il se caractérise par une ligne faîtière brisée et dont les nervures naissent au même niveau. Ce genre de voûte n'a presque pas besoin de tracé en élévation. Il suffit de tracer le plan et de connaître le rayon de l'arc principal (p), qui sert à construire toutes les nervures.

Hypothèse de construction

- On construit les tas-de-charge jusqu'à la hauteur de séparation des nervures. À ce niveau, on place la plate-forme de travail, sur laquelle on retrace le plan.
- Diagonale : on place d'abord le cintre de la diagonale et on trouve l'emplacement de l'étai de la clef 1 au fil à plomb.

Tiercerons : on place les cintres identiques à celui de la diagonale, jusqu'aux clefs marquées sur le plancher. Nous imaginons un cintre rigide formé de trois éléments, dont un est horizontal et fixé au plancher. Ainsi s'explique pourquoi les arcs naissent au même niveau.

- Liernes : une fois que les cintres des nervures principales et leurs clefs sont mis en position, on place des cintres entre les clefs pour la pose des liernes. Comme nos relevés l'ont montré, ces liernes ont aussi la même courbe que (p). Ces derniers éléments lient la structure principale transversalement en rendant la structure plus rigide et plus stable.
- On peut poser les blocs comme dans les cas précédents, en commençant par les clefs. Après les claveaux, on pose les voussoirs et on procède au remplissage des reins, en simultané, à partir des quatre extrémités, jusqu'au sommet de la voûte.

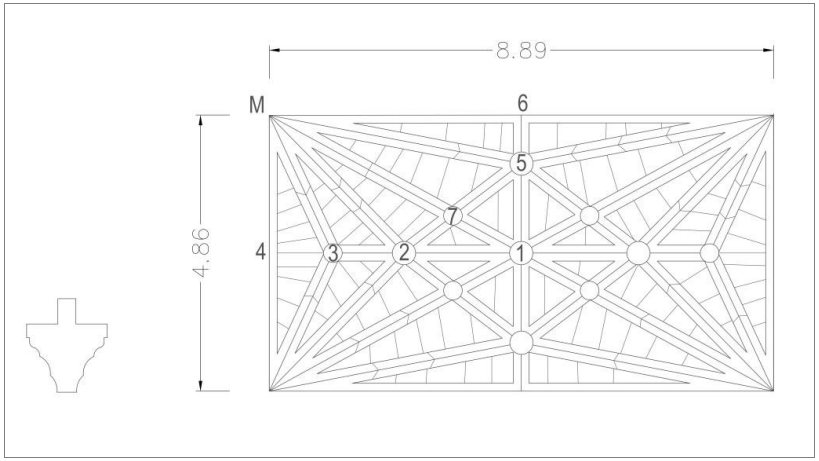


Figure 195. Plan des voussoirs de la voûte de la nef du monastère de Vilar de Frades.
Les nervures présentent le même profil et épaisseur (0,30m).

4.6 Église du couvent de São Francisco, à Porto

4.6.1 *Chapelle de Carneiros*

Certains auteurs attribuent cette chapelle à João de Castilho tandis que d'autres l'attribuent à son frère, Diogo de Castilho. L'analyse de la géométrie de la voûte nous indique en tout cas que ce n'est pas le style de Castilho. Après différentes études, nous pouvons l'affirmer par simple observation directe de la voûte. La ligne faîtière transversale est brisée et elle n'est pas constituée d'un arc de cercle unique. Ce n'est ainsi pas l'élévation qui commande la forme de la voûte.

La chapelle est bâtie sur un plan presque carré de 4,50m sur 4,38m pour une hauteur totale de 7,70m. La hauteur de la console (4,43m) est égale à la largeur du plan. En élévation, les diagonales et tiercerons sont tracées avec un même arc de cercle de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan (p). Les formerets présentent des arcs de cercles différents. Les lignes faîtières sont sans rapport avec le plan, mais elles suivent la même courbe que (p). Comme dans d'autres exemples, des contreforts à 45º sont placés aux angles des murs extérieurs.

Hypothèse de tracé en plan

- Sur le plan, on trace les diagonales et les axes de la voûte et on pointe les clefs centrales et des formerets, 1, 3 et 5.
- On trace les bissectrices entre ces lignes et on pointe les clefs 2 et 4 à l'intersection avec les axes.
- La clef intermédiaire 6 de la diagonale est à la même distance de la clef 1, que les clefs 2 et 4.
- On trace une droite entre 3 et 5 et, à l'intersection avec les bissectrices, on pointe les clefs intermédiaires 6 et 7.



Figure 196. Voûte de la chapelle de Carneiros du couvent São Francisco, à Porto.

Hypothèse de tracé en élévation

- On trace d'abord la diagonale de rayon égal à M-1 en plan.
- On pointe la clef 1. La clef intermédiaire 6 est située sur cet arc, il suffit de la projeter verticalement avec la distance M6 en plan.
- Les tiercerons M2 et M4 sont coïncidents avec la diagonale parce qu'ils naissent à un même niveau. Il suffit de projeter verticalement leurs clefs pour connaître leurs hauteurs. On procède de même pour trouver l'emplacement des clefs intermédiaires 7 et 8.
- Les formerets M3 et M5 sont tracés avec deux arcs de cercles de rayons différents. Le centre de M5 est au même niveau que celui de l'arc (p) alors que celui de M3 est plus élevé.

Hypothèse de construction

La construction de cette voûte suit une méthode différente que celle indiqué pour la chapelle de Vilar de Frades, malgré un plan similaire. On procède du bas vers le haut et on ne part pas de la ligne faîtière. On place d'abord les cintres, tous au même niveau, excepté celui du formeret M3, et la ligne faîtière prend la forme qui en découle. Le cercle central ne forme pas une coupole.

La méthode de pose des blocs est la même que pour tous les cas précédents : on part des quatre tas de charge jusqu'à la clef centrale. Les *combados* sont incorporés dans la maçonnerie au moment du remplissage des voûtains. Les nervures sont taillées avec des profils

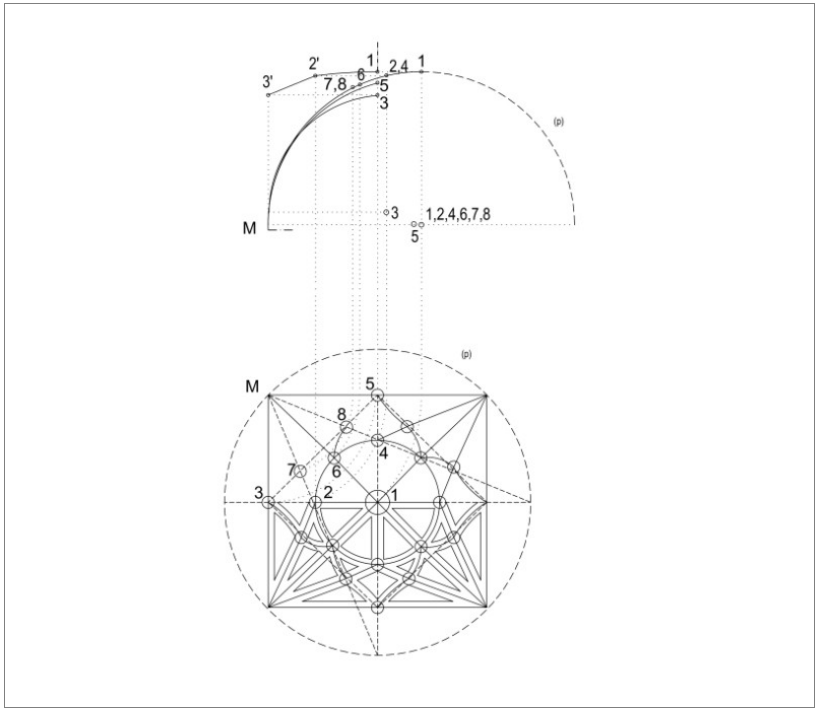


Figure 197. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la chapelle de Carneiros du couvent de São Francisco, à Porto.
Excepté les formerets, les nervures sont tracées avec un même arc de cercle dont le rayon est égal à la moitié de la diagonale en plan (p). La ligne faîtière transversale est brisée.

d'épaisseur identique (0,29m), les diagonales, les tiercerons et les liernes. Les formerets sont plus petits (0,17m). Les voussoirs sont disposés de manière concentrique au niveau des reins et parallèles aux axes de la voûte entre les *combados*.

4.7 Cathédrale de Viseu

4.7.1 *Nef*

La nef de la cathédrale de Viseu est la première des églises-halles du type en berceau que nous avons trouvée au Portugal. Les travées sont recouvertes de voûtes en croisée d'ogives reliées par des lignes faîtières dans le sens tant longitudinal que transversal. La forme arrondie de la ligne faîtière transversale est encore irrégulière, mais elle préfigure la continuité d'un mur à l'autre. Si on observe la section transversale (Figure 199), on note que, dans la nef latérale, la ligne faîtière s'élève entre la clef et l'arc longitudinal jusqu'à la hauteur de la voûte centrale. La continuité entre les nefs et les travées est renforcée par la présence de nœuds tout le long des lignes faîtières. On l'appelle couramment la « voûte à nœuds ».

La forme courbe transversale n'est pas continue mais, entre la clef centrale 1 et la clef du formeret 4, on peut tracer un arc de cercle de rayon égal à la diagonale du plan de la nef (annexe A95-96). Cette courbe est aussi celle des lignes faîtières longitudinales.

La hauteur de la voûte centrale (14,40m) est proche de la nef latérale (12,15m). La continuité de l'église se poursuit dans le transept (33,25m x 7,10m), qui adopte la même forme de voûte continue, avec l'ajout d'une travée de chaque côté, de même hauteur que la précédente. La colonne présente deux niveaux de chapiteaux (comme à Setúbal), celle de la nef latérale (7,42m) est environ à la mi-hauteur de la hauteur de la voûte. Les colonnes massives (1,80m de diamètre) limitent l'unité spatiale dans le sens diagonal de l'église.

Le plan de la voûte de la nef, tribune comprise, est de 24m sur 17m, sur trois nefs.



Figure 198. Voûte de la nef de la cathédrale de Viseu.

Hypothèse de tracé en plan

S'agissant de voûtes en croisée d'ogives, le plan est simple à tracer. Il suffit de diviser la largeur et longueur par le nombre de travées. Les travées centrales sont presque carrées, et les diagonales des travées latérales sont à 60º. On remarque que les voûtes sont postérieures aux murs et aux colonnes de l'église.

Hypothèse de tracé en élévation

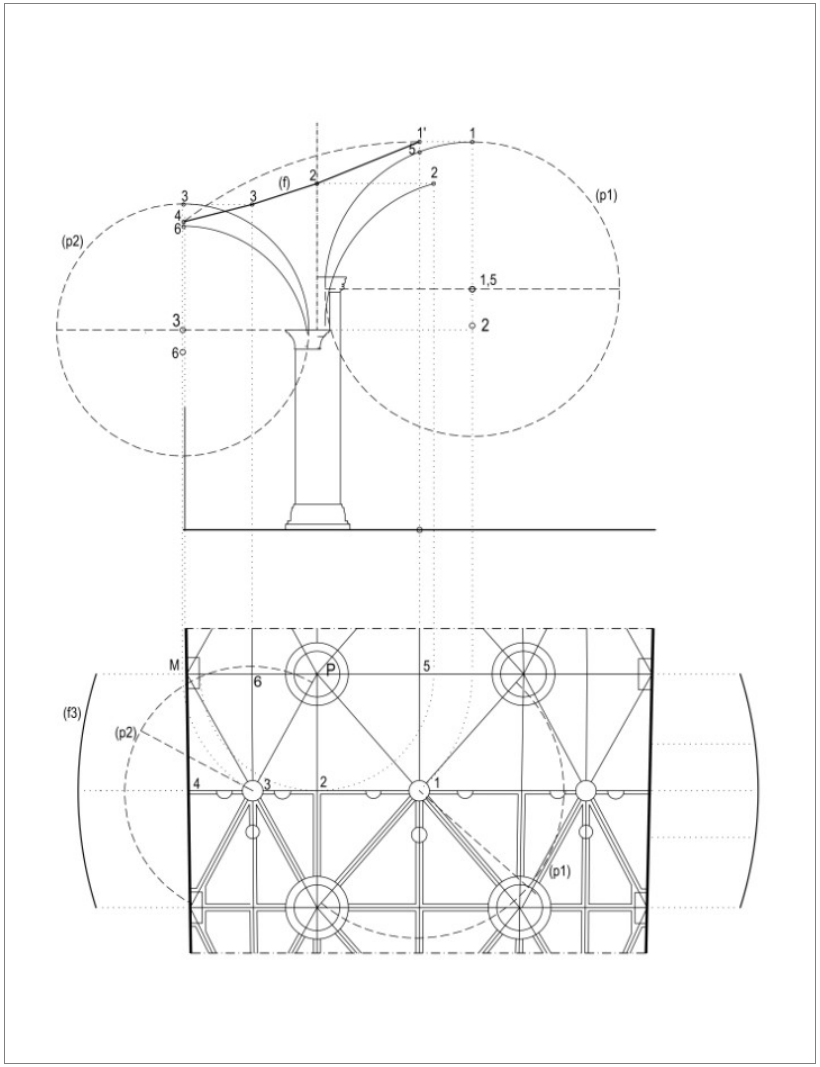
- On trace d'abord les diagonales des deux travées, chacune ayant un arc de cercle de rayon égal à la demi-diagonale en plan. Ces deux arcs sont les arcs principaux p1 et p2 utilisés pour les nervures. On pointe les clefs centrales 1 et 3.
- On trace les arcs transversaux et longitudinaux de rayons identiques à ceux des diagonales (p1 pour ceux de la travée centrale et p2 pour la travée latérale). Les arcs transversaux respectent la hauteur définie par la courbe de la ligne faîtière longitudinale, qui donne les clefs 5 et 6. L'arc longitudinal est tracé au niveau le plus bas des chapiteaux, avec le rayon de l'arc (p1), qui donne la clef 2.
- Tracer le formeret M6, jusqu'à la hauteur déterminée par l'arc de cercle 1-6, la forme « en berceau » envisagée. Le rayon du formeret est le même que (p1)

En reliant les clefs transversales, on obtient la ligne faîtière (f). La géométrie de cette voûte révèle que le tracé ne dépend pas de la ligne faîtière transversale, sauf pour la hauteur de la clef centrale et des formerets. S'agissant de la première voûte de ce genre que Castilho construisait, celui-ci n'a peut-être pas osé comme on le verra plus tard, utiliser la forme en berceau, à cause des problèmes de stabilité que cette forme pourrait impliquer.

Hypothèse de construction

Comme pour les églises à trois nefs, la construction de cette voûte a dû commencer par les bas-côtés, travée par travée, en poursuivant ensuite par la nef centrale.

- Construction d'une travée : on place d'abord les cintres des diagonales et l'étai de la clef centrale.
- On dispose les cintres des doubleaux et du formeret. Tous les cintres sont de courbe égale à (p2) sauf le doubleau longitudinal qui est égal à (p1) l'arc de la nef, plus grand que (p2). C'est pourquoi il est plus élevé que la normale.
- On place la cerce de la ligne faîtière transversale, qui prend les hauteurs des clefs du formeret, clef centrale et la hauteur de l'arc doubleau. Sa forme est par conséquent irrégulière, la courbe n'a pas été tracée préalablement.



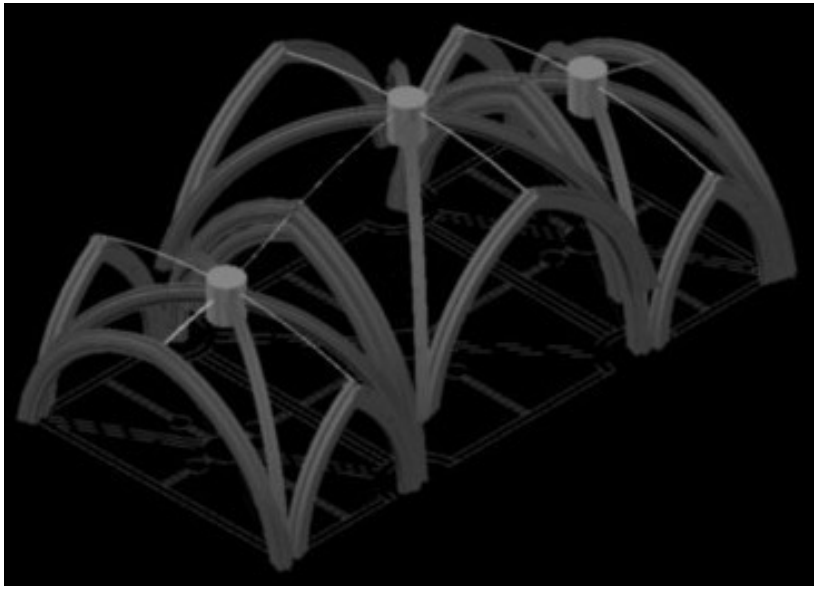


Figure 199. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la nef de la cathédrale de Viseu.
Sur chaque travée, les nervures sont tracées avec un arc de cercle de rayon égal à la demi-diagonale en plan. La ligne faîtière se rapproche d'une courbe, mais elle est brisée.

Figure 200. Dessin tridimensionnel de la voûte de la nef de la cathédrale de Viseu.
La forme arrondie de la ligne faîtière transversale est encore irrégulière.

- On pose la clef centrale, les claveaux et les voussoirs, et on effectue le remplissage des reins des quatre points d'appuis. On ferme les voûtains jusqu'à la clef centrale.
- Une fois que les bas-côtés sont construits, on passe à la construction de la nef centrale, de la même manière que les précédents.

Notons que les voussoirs sont disposés parallèlement aux murs et qu'ils sont particulièrement concaves entre chaque paire de nervures.

Les nervures transversales et longitudinales, de même profil, sont plus épaisses (0,49m) que les nervures diagonales (0,44m). Nous remarquons un détail du tas de charge de la dernière travée de la nef : vers le transept, les nervures se croisent à leurs naissances, caractéristique de João de Castilho déjà relevée par des historiens de l'art, comme nous l'avons indiqué au premier chapitre (figure 58).

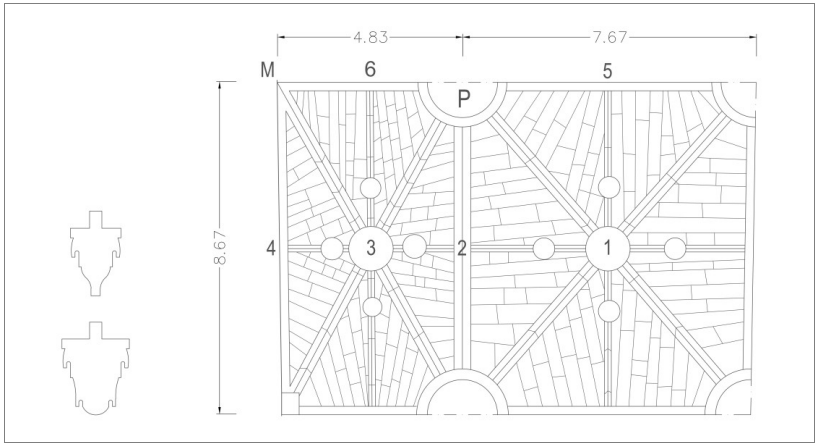


Figure 201. Plan des voussoirs de la nef de la cathédrale de Viseu.
Profils des nervures. Épaisseurs de haut en bas : diagonales et formerets (0,44m); longitudinales et transversales (0,49m).



Figure 202. Croisement des nervures à la retombée sur la console entre la nef et le transept.

4.7.2 *Narthex*

Le narthex de la cathédrale de Viseu possède un plan irrégulier, ses largeurs étant différentes (7,35 et 8,38m). D'une longueur de 17,00m, il est divisé en trois travées (7,50m en largeur au milieu). La travée centrale mesure en hauteur 6,38m pour 6,31m pour la travée latérale.

Les trois voûtes qui recouvrent l'espace semblent ne constituer qu'une unique couverture grâce au surbaissement des arcs en anse de panier (2,78m en hauteur) et à l'effet visuel des *combados* qui parcourent le sommet, presque au même niveau (un arc de cercle sur la travée centrale et un quadrilobe en accolade sur les deux travées latérales reliées entre elles par des liernes faîtiers).

Analysons la géométrie des voûtes. Notre relevé (annexe A97-98) indique que dans la voûte centrale toutes les nervures, sauf les transversales latérales, sont en anse de panier et qu'elles sont constituées des mêmes arcs de cercle, avec des hauteurs ou des inclinaisons différentes. La naissance de l'arc diagonal est à la hauteur de la console. Pour les tiercerons, le petit arc se relève et le grand arc s'abaisse pour arriver à la hauteur de clef préalablement déterminée par la ligne faîtière.

Les lignes faîtières ont la forme de deux arcs de cercles. Les faîtières des travées latérales prennent la forme du grand arc de cercle de (p). La travée centrale est plus surbaissée dans le sens longitudinal du narthex, dont la faîtière est un arc de cercle de diamètre égal à la longueur de l'église. Dans le sens transversal du narthex, la ligne faîtière est mixte, de même courbure que (p) dans la partie centrale, et horizontale entre le tierceron et l'arc transversal.

Analysons ce qu'aurait pu être le tracé de la voûte centrale.

Hypothèse de tracé du plan

- Étant donné le plan du narthex, on divise le plan en trois travées



Figure 203. Voûte du narthex de la cathédrale de Viseu.

dont la centrale a une forme presque carrée, la longueur étant identique à la largeur.

- Tracer les axes longitudinaux et transversaux et les diagonales de chaque travée. On trouve les clefs 1, 4, 7, 9 10 et 11.
- Diviser 1-4 en 3 pour obtenir les clefs 2 et 3. Sur la travée latérale, on reporte la même distance 4-9 sur la diagonale et on obtient la clef 12. À partir de 2, tracer la circonférence qui donne les clefs 5 et 8. Un arc de cercle de rayon P-4 donne la clef 6 à l'intersection avec l'axe transversal.

Hypothèse de tracé en élévation

- Diagonale : on trace d'abord l'arc de la diagonale, dont le rayon de l'arc principal est égal à la demi-longueur en plan du narthex (8,5m). Le centre du petit arc est à 1/8 de la portée et à 2/6 de la hauteur du centre de l'arc précédent. Une fois l'arc tracé, on pointe la clef 1.
- Lignes faîtières (f): à partir de la clef 1, on trace la ligne faîtière longitudinale. Sur (f), on pointe les clefs 2, 3 et 4, dont les distances sont tirées du plan.
- Tiercerons : pour tracer M3 et M6, on procède comme pour les voûtes précédentes, en reportant les distances sur le plan de l'élévation et en projetant verticalement les clefs jusqu'à leurs niveaux déterminés sur (f).

Nous observons que les ogives sont plus prononcées en avant que les autres nervures et que leur centre est au niveau du chapiteau, ce qui est visible à l'œil nu. Les naissances de M3, M4 et M6 sont plus élevées. On relève de petites différences dans les hauteurs des clefs centrales du cercle. La clef 8 est plus basse de 0,06m que la clef 2. Le cercle central ne prend pas une forme de coupole, ce qui n'est toutefois pas perceptible à l'œil nu, à cause du surbaissement de la voûte.

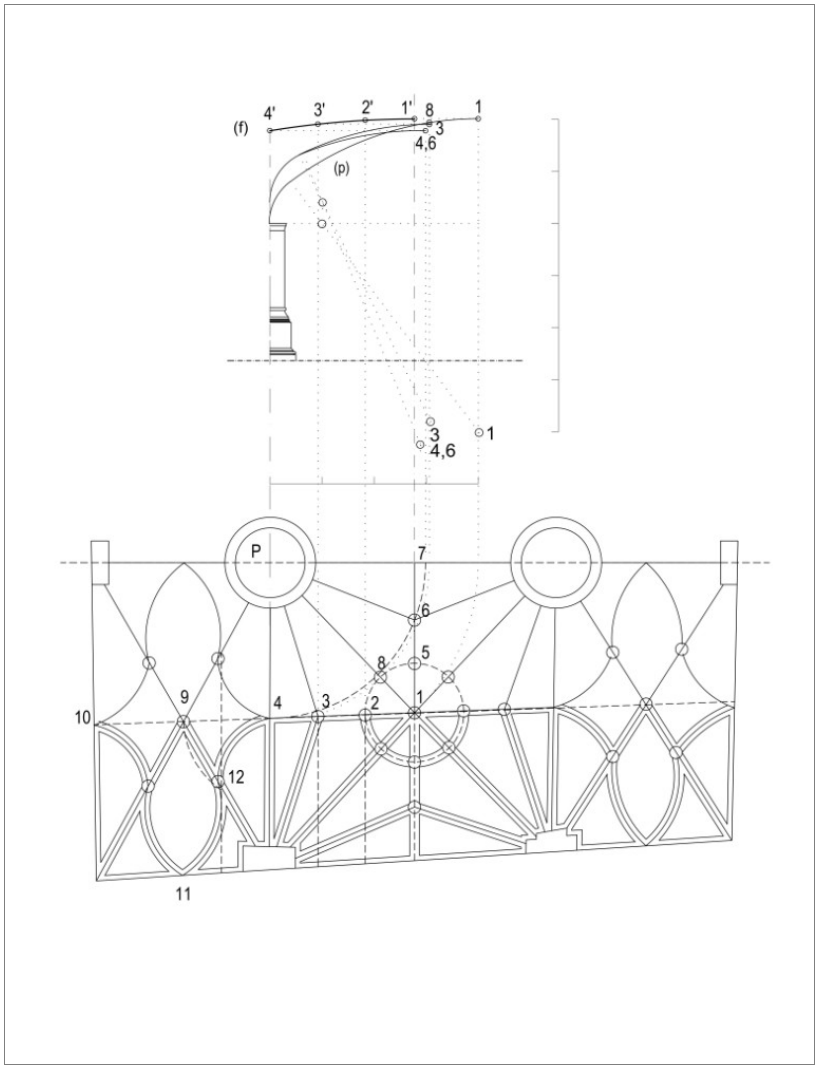
Hypothèse de construction

Les nervures sont taillées avec des profils et des dimensions différentes. Les ogives sont les plus épaisses (0,40m), suivi des transversales, longitudinales, tiercerons, liernes et *combados*.

Les tas de charge sont taillés sur la base des modèles tirés du tracé précédent. Les sommiers sont posés jusqu'au point de séparation des nervures.

Pour les deux travées, la méthode de cintrage est la même.

- On commence par la pose des cintres des diagonales et des étais des clefs principales 1 et 9.
- À partir des clefs centrales, on pose les cerces des lignes faîtières, longitudinale et transversale.
- On trouve l'emplacement des clefs intermédiaires des lignes faîtières et des ogives à l'aide d'un fil à plomb et on place les étais.



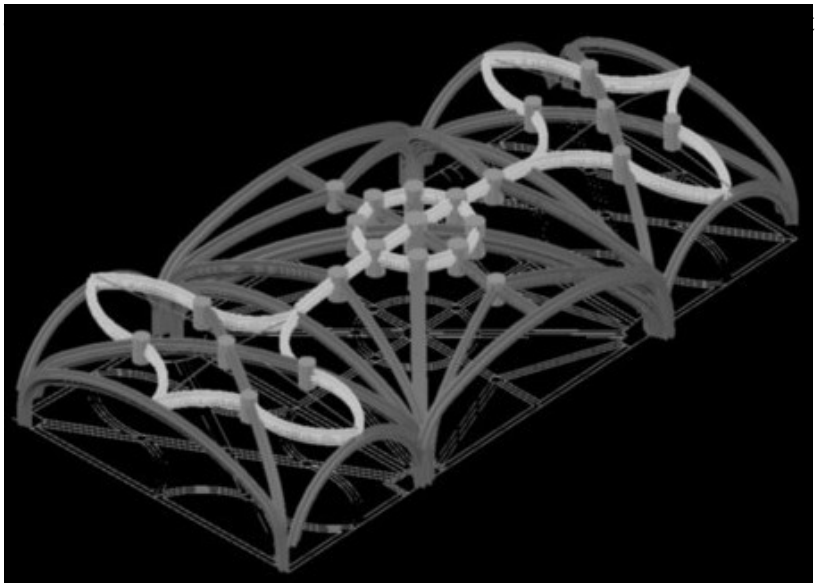


Figure 204. Hypothèse de tracé en plan et en élévation du narthex de la cathédrale de Viseu.
Dans la travée centrale, toutes les nervures excepté les transversales, sont en anse de panier, constituées d'arcs de cercle de rayons identiques, avec des centres positionnés à différentes hauteurs.

Figure 205. Dessin tridimensionnel de la voûte du narthex de la cathédrale de Viseu.

- d’appui. En arrivant aux formerets, les *combados* sont disposés tout autour de la voûte. On poursuit en positionnant les rangées de voussoirs parallèlement aux murs, à la française.
- Après la construction des deux travées latérales, on passe à la nef centrale en suivant la même méthode. Nous observons dans la disposition des voussoirs que, en arrivant au cercle central, ils sont disposés de manière concentrique par rapport à la clef centrale.

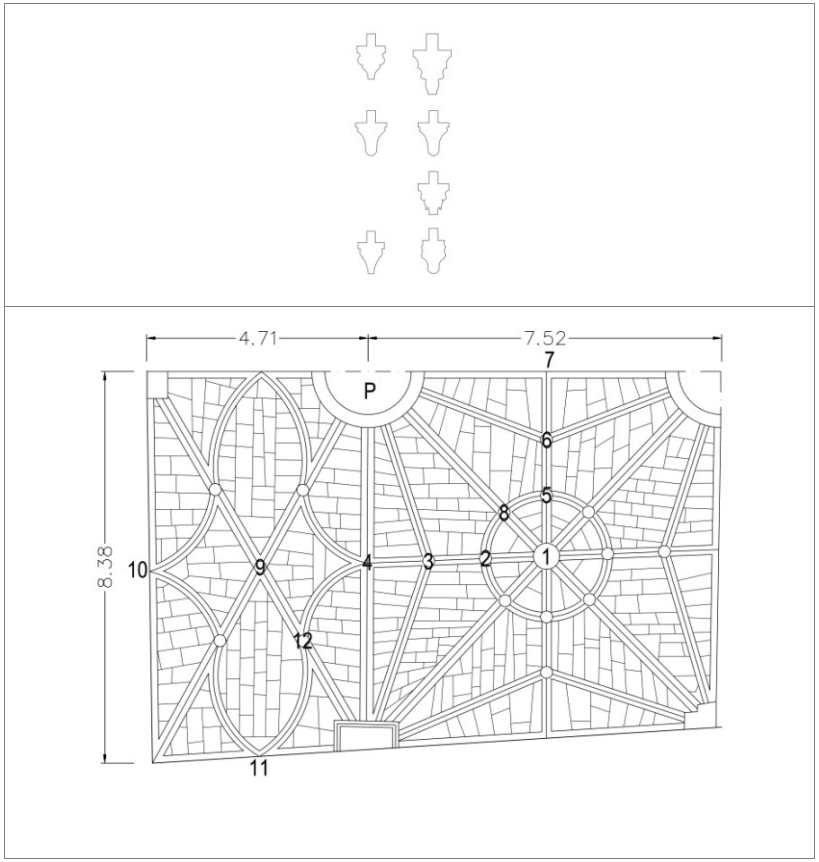


Figure 206. Plan des nervures et des voussoirs du narthex de la cathédrale de Viseu
Profils et épaisseurs des nervures des travées latérale et centrale: diagonales (0,30m et 0,40m); longitudinales (0,30m); transversales (0,28m); formerets et liernes (0,28m).

4.8 Église matrice de Freixo de Espada-à-Cinta

4.8.1 *Nef*

La voûte de l'église-halle de Freixo de Espada-à-Cinta mesure 31,10m x 15,90m. Elle repose sur des sveltes colonnes de 0,76m de diamètre, ce qui dégage une vue globale dans le sens longitudinal, transversal et diagonal de l'église. Chaque travée comporte des nervures longitudinales, transversales et diagonales. La ligne faîtière longitudinale horizontale suit l'axe de la nef et de chaque bas-côté. Une ligne faîtière unique traverse la nef transversalement d'un mur à l'autre en suivant une courbe continue. Les clefs des nervures longitudinales et diagonales entre les piliers se situent par conséquent sur cette ligne transversale. La hauteur de la voûte est de 12,34m dans la nef centrale et de 12,06m dans les bas-côtés, dimensions beaucoup plus proches que celles de la nef de Viseu. Cette ligne courbe qui unifie la nef et les bas-côtés était l'idée directrice du projet.

Nos relevés montrent que les deux arcs de cercle des diagonales sont les courbes principales des deux travées qui ont aussi été réutilisés pour toutes les nervures. Deux nervures de la nef latérales présentent en outre une courbe supplémentaire au niveau du tas de charge afin de se raccorder tangentiellement à la verticale des appuis.

Hypothèse de tracé en plan

- On divise le plan en travées. La travée de la nef centrale est presque carrée (6,69m x 6,23m) et celle de la nef latérale présente une proportion de 4:3 (6,23m x 4,62).

On trace les axes longitudinaux et transversaux et les diagonales de chaque travée. On trouve toutes les clefs de la voûte : 1, 2, 3, 4, 5 et 6.



Figure 207. Voûte de la nef de l'église matrice de Freixo de Espada-à-Cinta.

Hypothèse de tracé en élévation

- On trace les diagonales des deux travées avec l'arc de cercle de rayon égal à la demi-diagonale en plan, les arcs principaux (p1 pour la nef et p2 pour les bas-côtés). Pointer les clefs centrales 1 et 3.
- Tracer la ligne faîtière transversale : cet arc de cercle (f) est tracé avec trois points : la clef 1 de la nef centrale et les clefs des deux bas-côtés, de hauteur identique à la clef 3. Sur (f) on pointe la clef 2 du formeret et la clef 4 de la nervure longitudinale. Toutes les clefs sont ainsi positionnées sur cette ligne et on peut tracer l'élévation des nervures.
- Pour tracer les nervures, la méthode est la même que celle appliquée aux cas précédents : on reporte les distances en plan en élévation ; projeter verticalement la clef jusqu'à la hauteur fixée sur (f), trouver le centre de l'arc et tracer avec le rayon de (p1) pour les nervures de la nef et (p2) pour celles des bas côtés. Nous voyons sur le tracé que les arcs s'élèvent ou s'abaissent en fonction de la hauteur de clef à atteindre.

Hypothèse de construction

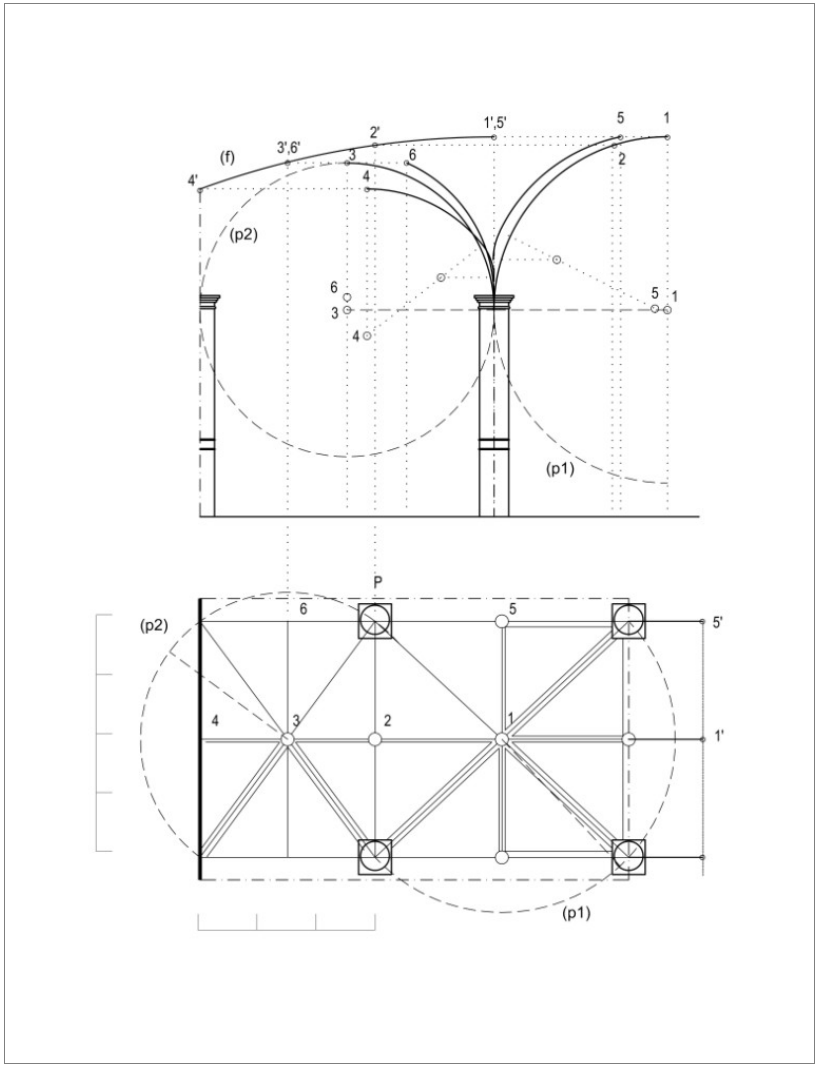
- La construction de cette voûte, doit se faire par travée, la nef centrale et les deux bas-côtés, l'espace correspondant à la ligne faîtière.
- Diagonales : on place d'abord les cintres des nervures diagonales (arc en plein centre p1 et p2) et l'étai donnant la hauteur de la clef centrale.
- Ligne faîtière transversale : on place la cerce de la ligne faîtière transversale, qui passe par les trois clefs précédentes. Sur cette ligne, on place l'étai de la nervure longitudinale 2 et du formeret 4.
- Ligne faîtière longitudinale et nervures transversales : reprenant la hauteur des clefs centrales 1 et 3, on place des étais pour les clefs 5 et 6 et on place des cerces horizontaux entre ces clefs (la ligne faîtière longitudinale).
- Pose des clefs : une fois que les cintres de toutes les nervures sont placés, on peut poser les pierres. D'abord les clefs. Après les claveaux des nervures, les voussoirs et le remplissage des colonnes et des consoles, en simultanée. Après le remplissage, on ferme d'abord les deux bas-côtés et ensuite, la nef centrale.

Concernant les détails constructifs, on remarque que les profils des nervures longitudinales et transversales sont similaires et plus épais (0,43m) que ceux des diagonales (0,34m) et des liernes (0,28m) (Figure 10). Les voussoirs sont disposés parallèlement aux murs.

Extrados de la voûte

Nous avons eu la possibilité d'accéder à l'extrados de la voûte, et nous avons effectué le relevé pour obtenir l'épaisseur de la voûte.

Nous avons observé que toute la voûte est recouverte d'un blocage. L'extrados prend la forme courbe de l'intrados, au long des lignes



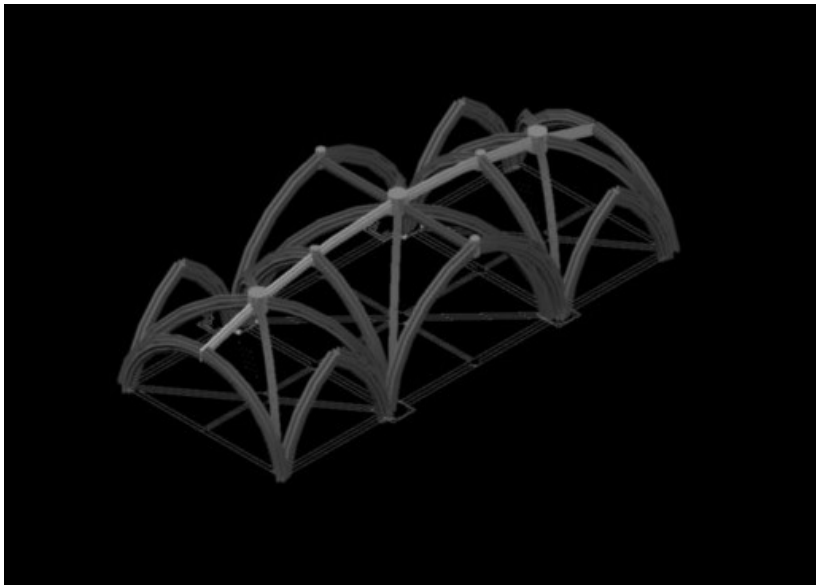


Figure 208. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la nef de l'église matrice de Freixo de Espada-à-Cinta.
Une ligne faîtière unique traverse la nef transversalement d'un mur à l'autre en suivant une courbe continue. Dans chaque travée, les nervures sont tracées avec un arc de cercle de rayon égal à la demi-diagonale en plan.

Figure 209. Dessin tridimensionnel de la voûte de la nef de l'église-matrice de Freixo de Espada-à-Cinta.

faîtières, où l'épaisseur est de 0,18m (voussoir + blocage).

La forme est irrégulière au long des colonnes (Figure 211); à l'endroit du remplissage des reins, on trouve une hauteur de 3,00m entre le chapiteau et l'extrados. Nous n'avons pas effectué de sondages pour connaître l'épaisseur des voûtains, mais nous pouvons imaginer un détail similaire à celui de Jerónimos, soit une fine épaisseur des voussoirs, environs 0,10m.

Il était intéressant de constater la présence de fissures sur l'extrados de la voûte, dans la seconde, troisième et quatrième travées, entre les colonnes, dans le sens longitudinal de la nef, ce qui indique un comportement typique de voûtes en croisée d'ogives dû aux efforts plus importants dans la nef centrale.

À l'intrados nous avons constaté qu'il existe des crampons en fer au long de la ligne faîtière transversale de la dernière travée, contigu au chœur. Ces crampons sont placés entre les claveaux des liernes, ils semblent postérieur à la construction, probablement placés là pour lutter contre la déformation de la voûte. (Figure 212)

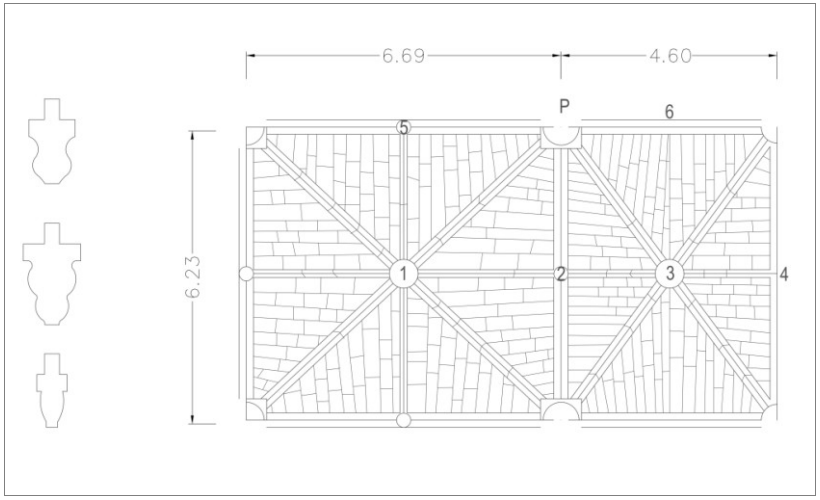


Figure 210. Plan des nervures et des voussoirs de la voûte de la nef de l'église de Freixo de Espada-à-Cinta.
Profils et épaisseurs des nervures, de haut en bas : diagonales et formerets (0,34m); longitudinales et transversales (0,43m); liernes (0,28m).



Figure 211. Extrados de la voûte de l'église de Freixo de Espada-à-Cinta.



Figure 212. Crampons métallique liant les claveaux des liernes faîtières de la voûte de la nef.



Figure 213. Extrados de la voûte du chœur.
Le queutage des nervures courbes est sur même plan que l'extrados des voûtains.

4.8.2 *Chœur*

Nous n'avons pas effectué le relevé de la voûte du chœur de l'église de Freixo de Espada-à-Cinta, qui était alors en travaux de conservation dirigés par l'Institut Portugais du Patrimoine Architectural (IPPAR). Cependant, des échafaudages sur place nous ont permis d'accéder à l'intrados et de voir des détails constructifs



Figure 214. Voûte du chœur de l'église de Freixo de Espada-à-Cinta. (Superficie Lda.)

de près.

Notre analyse géométrique se base sur le relevé par numérisation laser effectué par Superfície, Lda pour l'Institut du Patrimoine (IPPAR) en 2004.

Le chœur de l'église est recouvert par une voûte à *combados*, en forme de quadrilobe en accolade. La voûte est constituée de croisée d'ogives et des tiercerons en forme d'étoile, qui reposent sur des consoles placées aux angles et sur des murs de 0,80m d'épaisseur. À l'extérieur, deux contreforts sont orientés dans le sens des diagonales. Le plan du chœur est presque carré (6,05m x 5,87m) et la hauteur totale est de 19,56m.

Selon les plans qui nous ont été fourni, l'analyse de la géométrie de la voûte (annexe A23-24), indique :

- En plan, les tiercerons sont tracés aux bissectrices des angles formés par les diagonales et les formerets.
- En élévation, les nervures sont toutes tracées avec l'arc de cercle de rayon de la moitié de la diagonale en plan. Les deux lignes faîtières ont une courbe dont le rayon correspond à la largeur de la voûte. Nous pouvons observer la forme créée par ces nervures dans le modèle tridimensionnel, qui inclut des courbes de niveau. Notons qu'il s'agit d'une forme en coupole et que les *combados* sont horizontaux.

La méthode de tracé en plan et en élévation et la construction de cette voûte doivent être similaire à celle que nous avons expliquée pour la sacristie de Jerónimos. Elles sont du même type de voûte à *combados*, dont l'élévation des arcs dépend de la hauteur dictée par les deux lignes faîtières de la voûte. La différence entre elles réside dans la forme des arcs : ici les nervures principales sont des arcs de cercle – pas des anses de panier - et les lignes faîtières sont plus bombées. Son rayon est égal à la largeur et non pas à la diagonal, comme à la sacristie.

A notre avis, ces différences de forme ne justifient pas de ne pas attribuer la voûte à Castilho. On note que les formerets semblent avoir été construits avant la conception de la voûte cas ils sont beaucoup plus bas que la ligne faîtière.

Analysons à présent les détails. Les nervures sont toutes de profil et d'épaisseur (0,29m) égaux, les ogives, les tiercerons, liernes et combados. Seuls les formerets sont différents (0,17m). À l'extrados, on observe que les queutages des *combados* sont sur le même plan que l'extrados des voûtains, dont l'épaisseur varie entre 0,10m et 0,12m (Figure 213); les nervures droites en plan (diagonales et tiercerons) n'étaient pas visibles depuis l'extrados. Le remplissage des reins de la voûte est constitué de pierres maçonnées recouvertes d'une couche de mortier.

L'observation en détail des *combados* situés sur le même plan que les voussoirs sur l'extrados confirme que ces éléments font plus partie des voûtains que des nervures.

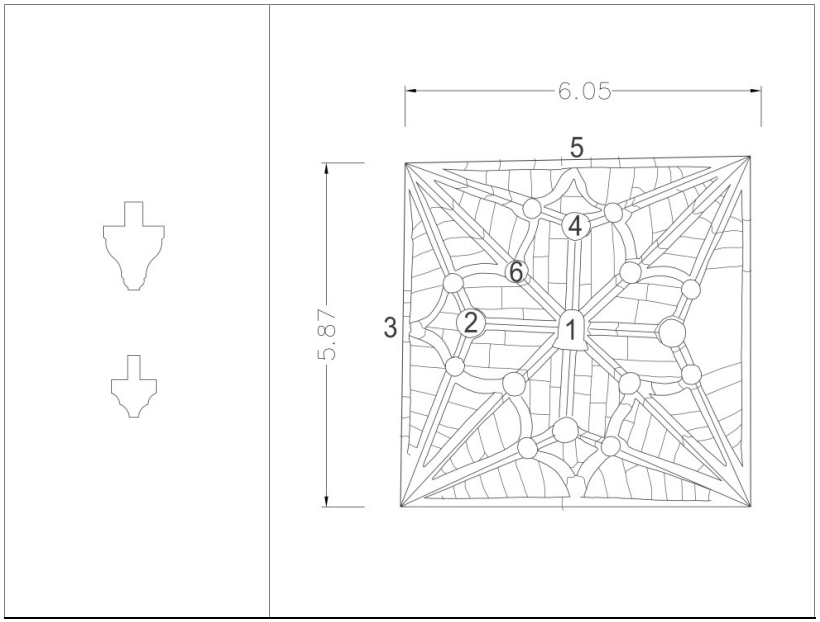


Figure 215. Plan des nervures et des voussoirs.
Chœur de l'église matrice de Freixo de Espada-à-Cinta.
Profils et épaisseurs des nervures : diagonales, tiercerons et liernes (0,29m); formerets (0,17m).

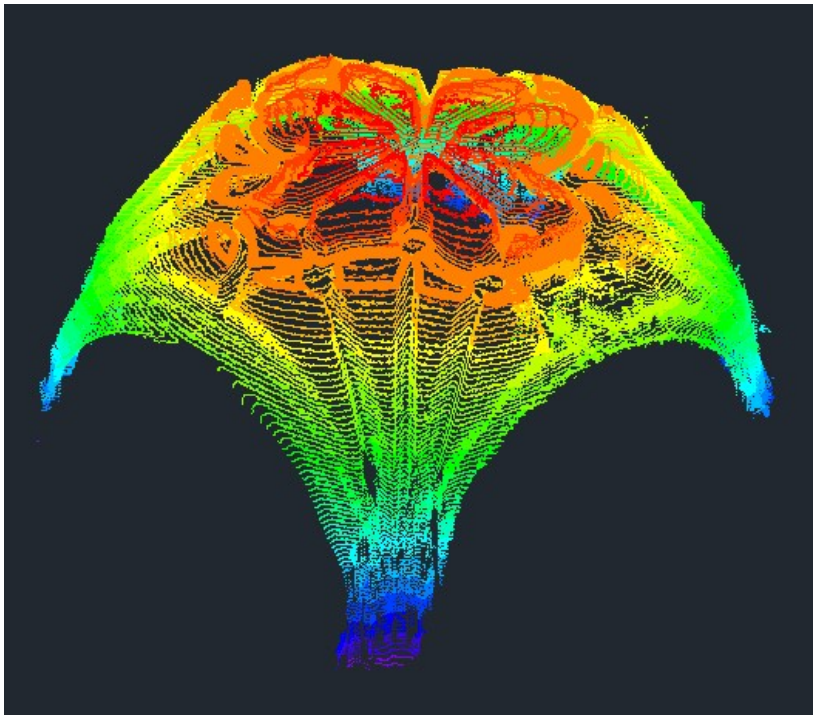


Figure 216. Dessin tridimensionnel de la voûte du chœur de l'église matrice de Freixo de Espada-à-Cinta.
(Superficie Lda.)
Les *combados* sont horizontaux et délimitent un sommet en forme de coupole.

4.8.3 *Chapelle gauche du chœur*

Bien que l'étude historique nous enseigne que les chapelles latérales du chœur seraient tardives, nous avons relevé celle-ci pour confirmer la géométrie de la voûte et pour pouvoir comparer avec les voûtes manuélines. (annexe A25-26), La voûte est sur plan carré, à *combados* disposés de manière convexe par rapport à la clef centrale. En élévation, toutes les nervures ont également un arc de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan, avec la différence que cette courbe se trouve à l'intrados des nervures. La différence majeure entre cette voûte plus tardive et les voûtes manuélines à l'analyse, est que la forme des lignes faîtières est beaucoup plus bombée. La diagonale de cette circonférence est égale à la hauteur totale de la voûte.



Figure 217. Voûte de la chapelle gauche du chœur de l'église-matrice de Freixo de Espada-à-Cinta.

4.9 Église de Misericordia à Freixo de Espada-à-Cinta

4.9.1 *Chœur*

Le chœur de l'église de Misericordia est un espace de plan rectangulaire (6,00m x 3,60m) recouvert d'une voûte à *combados* culminant à 11,35m.

La voûte est formée d'une croisée d'ogives et de paires de tiercerons – deux de chaque coté longitudinal – pour un total de 15 clefs. Outre la clef centrale, elle possède aussi deux clefs de chaque coté longitudinalement, une autre transversalement ainsi que des clefs intermédiaires sur les diagonales et les tiercerons. L'axe des clefs est toujours vertical. Les deux lignes faîtières - longitudinale et transversale - sont horizontales, caractéristique inhabituelle dans une voûte à combados

Nos relevés indiquent que toutes les nervures ont la même courbure dont le rayon est égal à la demi-longueur de la diagonale en plan.

Quant aux dimensions, le profil des ogives est plus large et plus épais (0,28m) que les tiercerons et les liernes, qui ont un même profil (0,16m d'épaisseur), et que les formerets (0,13m), les plus petites nervures. Au niveau des tas de charge, on observe que les nervures naissent à des niveaux différents : les ogives commencent le plus bas, suivies des tiercerons et finalement des formerets. Cela correspond à notre relevé, quand on observe le centre des arcs.

Pour expliquer comment cette voûte a pu être conçue, nous présentons à la (Figure 219) le tracé de la voûte en plan et en élévation.

Hypothèse de tracé en plan

- On trace un rectangle de largeur égale aux 3:5ème de sa longueur et ensuite les diagonales et pointer la clef centrale 1.
- On trace les deux axes (lignes faîtières longitudinale et



Figure 218. Voûte à *combados* du chœur de l'église de Misericordia de Freixo de Espada-à-Cinta**.**

transversale) et on pointe les clefs des formerets 4 et 6 ;

- La bissectrice de M-1 et M-6 est le tierceron M-5 ; son intersection avec la ligne faîtière transversale (f) donne la clef 5.
- Clefs de la ligne faîtière longitudinale : le tierceron M-2 a le même angle que la diagonale que M-5 ; l'intersection du tierceron avec la ligne faîtière (f) donne la clef 2. La clef 3 est centrée entre (2) et (4), donnant le tierceron M-3.
- Clefs intermédiaires : du centre 1, on trace un cercle de rayon (1-2); à son intersection avec le tierceron M-5, on trouve la clef intermédiaire (8). On trace un cercle de rayon (1-2) donnant la clef de la diagonale (7).
- On peut ensuite tracer les nervures curvilignes.

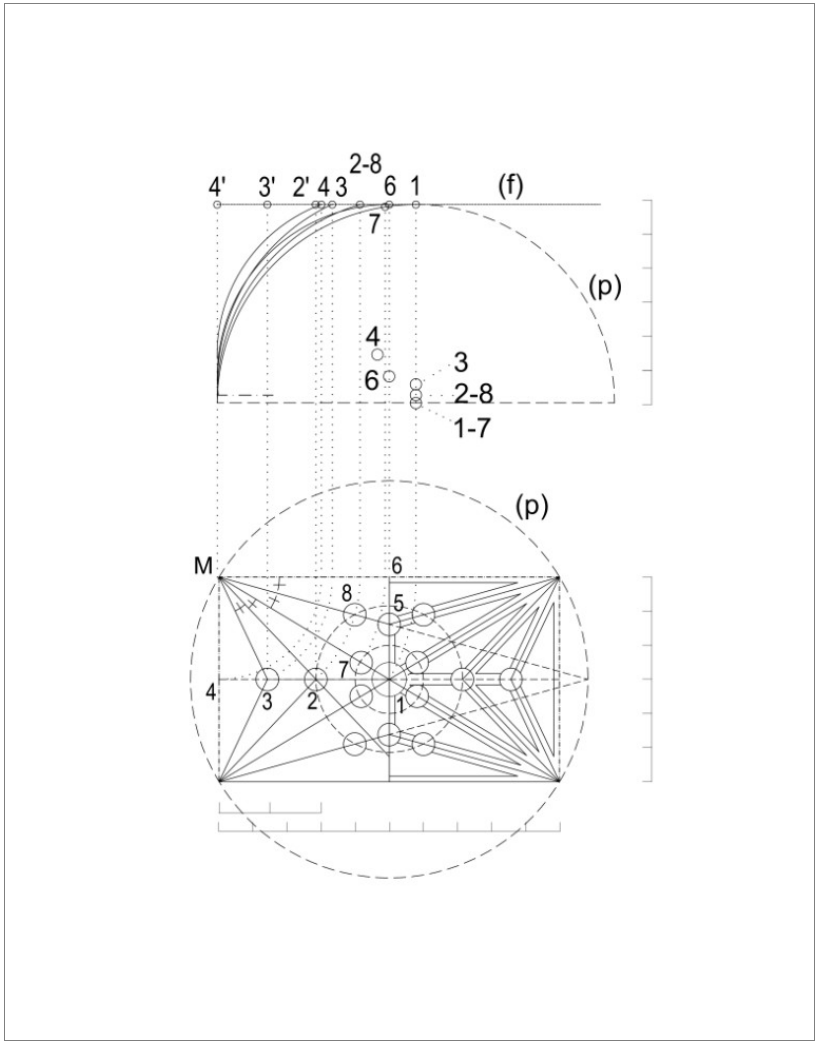
Hypothèse de tracé en élévation

- Lignes faîtières : On trace la ligne faîtière (f) horizontale à 11,35m de hauteur, qui régit la hauteur de toutes les clefs.
- Ogives (p) : on prend la longueur de M-1 en plan qu'on projette verticalement jusqu'à la ligne faîtière, où on localise la clef 1 ; le rayon est égal à la longueur M-1, on trace l'arc principal (p) en demi-cercle tangent au mur.
- Tiercerons : on reprend leurs longueurs en plan et on les projette verticalement jusqu'à (f), où on trouve l'emplacement des clefs 2, 3, et 5 ; dans la verticale de (1), avec la même ouverture de compas que (p), on trace les arcs dont les centres sont plus élevés à partir de chaque clef jusqu'à la tangente au mur.
- Formerets : ces deux nervures présentent des arcs différents. Le formeret longitudinal M-6 est en plein cintre et M-4 est un arc en tiers-point.

Nous constatons que les centres des nervures sont situés à différents niveaux. Elles naissent donc à des niveaux différents sur le tas de charge, ce que nous avions constaté à l'œil nu sur place.

Hypothèse de construction

- Diagonale : Une fois le tracé reproduit sur la plate-forme de travail, la première chose à faire est de poser le cintre de la diagonale. On trouve ensuite l'emplacement de la clef 1 à l'aplomb de sa position sur le plancher. On place un étai de cette hauteur, qui sera la hauteur pour toutes les clefs situées sur les axes.
- Lignes faîtières (f) : reprenant la hauteur de la clef 1, on place les deux cerces des deux lignes faîtières (longitudinale et transversale), on localise les clefs 4 et 6 des formerets et les autres clefs intermédiaires au fil à plomb à partir des cerces 2, 3 et 5 ; on place ensuite les étais, de même hauteur que 1.
- Tiercerons : on place les cintres de chaque nervure entre le tas de charge en attente et sa clef sur la ligne faîtière.



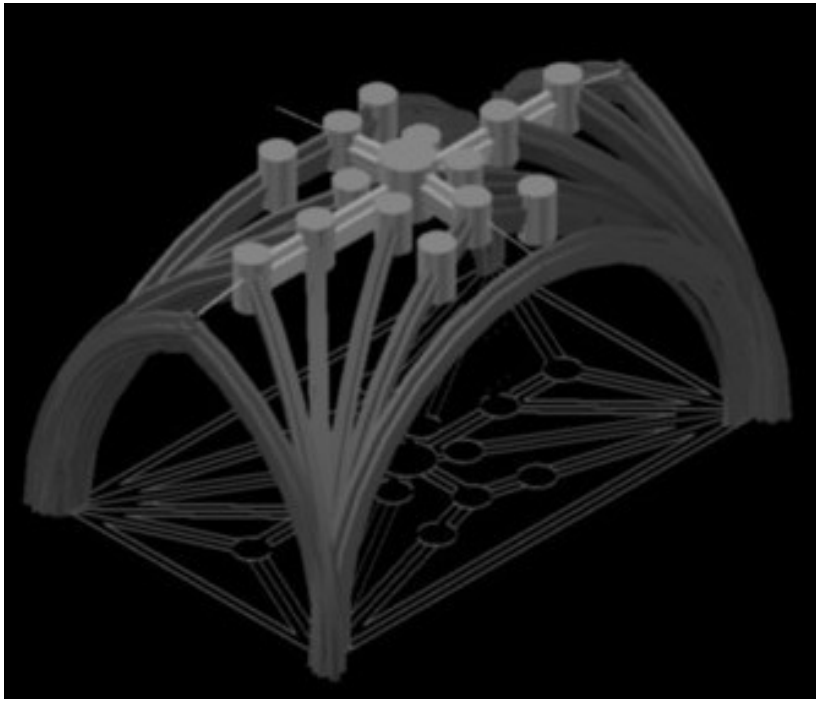


Figure 219. Voûte du chœur de l'église de Misericordia de Freixo de Espada-à-Cinta.
Hypothèse de tracé en plan et en élévation. Toutes les nervures, sauf les formerets, ont le même arc de cercle (p), de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan. Pour arriver à la hauteur déterminée par les lignes faîtières, les arcs s'élèvent ou s'abaissent.

Figure 220. Modélisation de la voûte montrant la forme et mettant en évidence les deux lignes faîtières horizontales.

- Clefs intermédiaires : on localise au fil à plomb les clefs 7 et 8 de la diagonale et du tierceron M-5, comme expliqué ailleurs.
- Pose des pierres : une fois que la structure en bois est terminée et que l'ensemble est stable, on pose les clefs. On commence les voussoirs depuis les quatre tas de charge simultanément en posant les claveaux des nervures, tout en effectuant le remplissage des reins pour stabiliser la structure.
- *Combados* : en arrivant aux premières clefs intermédiaires, on introduit les *combados* comme s'il s'agissait de voussoirs. Ces nervures courbes en plan, mais ici de profil horizontal, relient toutes les nervures, diagonales et tiercerons. Les clefs qui les relient sont munies des branches en attente des nervures.
- On continue à poser les pierres jusqu'à la clef centrale et on finit en recouvrant le tout avec du mortier à la chaux qui fera une prise lente donnant cohésion à la structure. L'opération se termine par le décintrage.

4.10 Église matrice d'Arronches

4.10.1 *Nef*

L'église-halle d'Arronches mesure 30,70m sur 15,30m et elle est recouverte de voûtes en croisée d'ogives sur cinq travées. Dans le sens transversal, on ne peut plus parler de travées, parce que la nef et les bas-côtés ne sont segmentés par aucune nervure longitudinale : les voûtes fusionnent en une seule nef, en soulignant le caractère transversal de la voûte et en dégageant les perspectives diagonales. Les lignes faîtières transversales s'arrêtent avant le mur, à la clef de voûte du bas-côté. Sa forme est courbe, d'une hauteur de 12,35m dans la nef et de 11,60m dans les bas-côtés.

La voûte est délimitée par des murs de 1m d'épaisseur et elle repose sur des colonnes sveltes d'un diamètre de 0,73m. À l'extérieur, les contreforts sont alignés avec les colonnes et positionnés diagonalement aux angles.

Comme à Freixo de Espada-à-Cinta, les nervures diagonales en demi-cercle sont les arcs principaux p1 et p2 réutilisé pour toutes les autres nervures. La courbure de la ligne faîtière correspond à une circonférence dont le diamètre est égal à la longueur totale de l'église (annexe A3-4).

Hypothèse de tracé en plan

- On divise le plan en trois travées, de proportion 3:4 sur la nef latérale ; la travée centrale est presque carrée.
- On trace les axes et les diagonales pour trouver les clefs de la voûte.



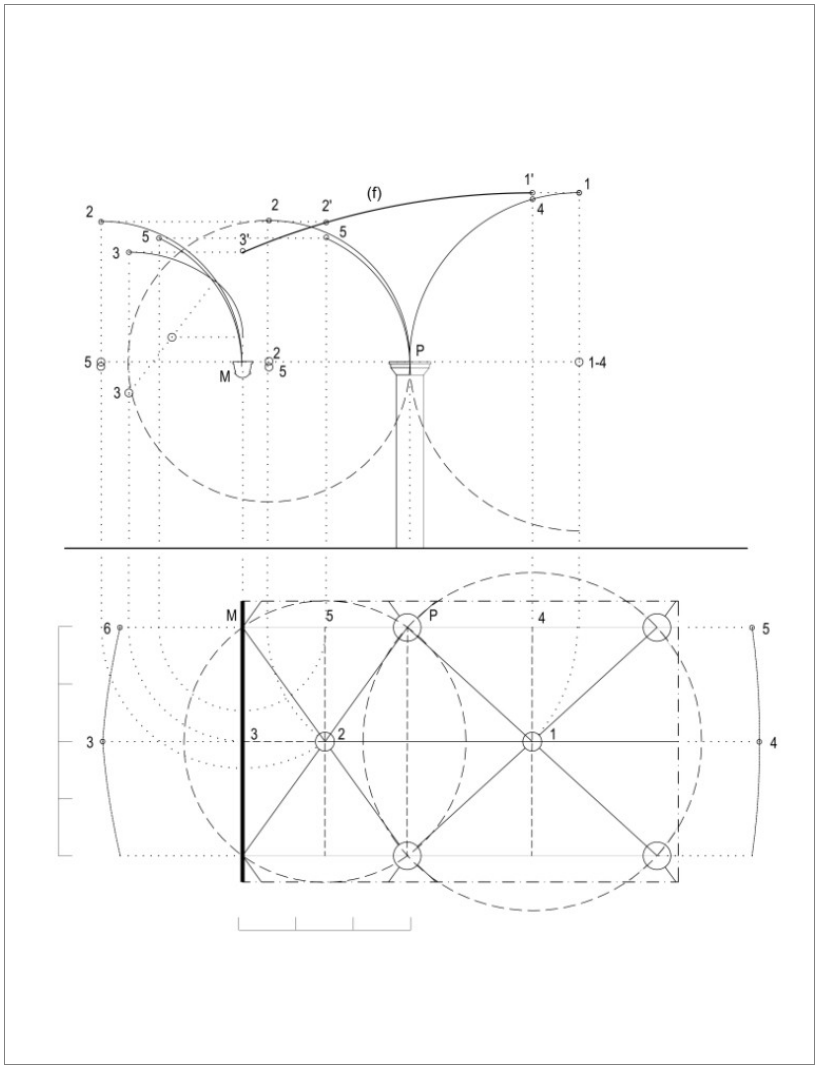
Figure 221. Voûte de la nef de l'église matrice d'Arronches.

Hypothèse de tracé en élévation

- Diagonale : on trace les diagonales en demi-cercle, et on pointe les clefs 1 et 2.
- Ligne faîtière transversale : à partir des deux points précédents et d'un troisième point symétrique à 2 (bas-côté droit, non représenté sur notre tracé), on trace l'arc de cercle de la ligne faîtière transversale. Une autre possibilité serait d'effectuer le tracé à partir du plan, soit à partir de la demi-longueur de l'église. Sur la ligne faîtière, on trouve le sommet du formeret, le point 3.
- Transversales et formerets : on trace des arcs de cercle avec le rayon de p1 et de p2. L'arc P-4 coïncide avec l'arc P-1. L'arc P-5 est situé un peu plus bas que P-2, peut-être en conséquence de tassements naturel de l'ouvrage. Pour la construction, il serait plus logique que P-4 soit à la même hauteur que P-5, dès lors que la ligne faîtière longitudinale obtenue ne semble pas être une condition pour la construction de P5. P3 et P5 sont des arcs qui ont deux centres afin de se raccorder verticalement au mur.

Hypothèse de construction

- Les nervures sont taillées avec des profils différents, les transversales sont les plus épaisses (0,37m), suivies des diagonales (0,30m) et finalement des liernes de la ligne faîtière (0,25m).
- Une fois disposés les tas de charge, on trace le plan sur la plateforme de travail et on commence la pose des cintres.
- On place d'abord les cintres des diagonales, en demi cercle, et des étais des clefs centrales, dont on trouve l'emplacement à l'aide d'un fil à plomb aligné selon le tracé reproduit sur le plancher.
- On place une grande cerce pour la ligne faîtière transversale, entre ces trois clefs. On obtient la hauteur des formerets.
- On place les cintres des transversales et entre leurs sommets et les clefs centrales et on place les cerces des lignes faîtières longitudinales.
- Tous les cintres sont placés. On peut poser les clefs des diagonales et ensuite les claveaux des nervures, et remplir les voûtains des tas de charge jusqu'au sommet de la voûte. Les voûtains de cette voûte sont en brique. Les reins sont remplis de maçonnerie, comme nous l'avons vu à Freixo de Espada à Cinta.



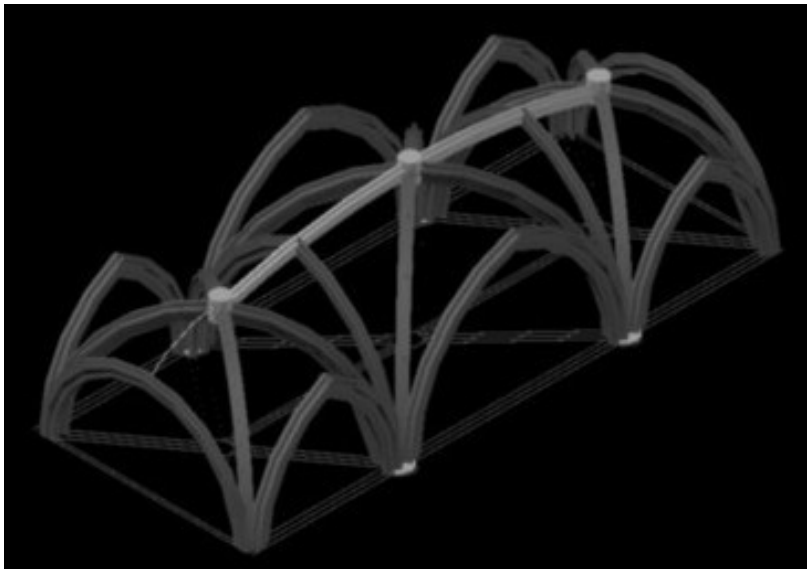


Figure 222. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la nef de l'église matrice d'Arronches.
Les nervures diagonales en demi-cercle sont les arcs principaux (p1) et (p2) qui ont été réutilisés pour toutes les autres nervures. La courbure de la ligne faîtière correspond à une circonférence dont le diamètre est égal à la longueur totale de l'église.

Figure 223. Dessin tridimensionnel de la voûte de la nef de l'église matrice d'Arronches.
La ligne faîtière courbe couvre les trois nefs.

4.10.2 *Chapelle droite de la nef*

La voûte de la chapelle est une simple croisée d'ogives et elle est formée de deux arcs en demi-cercle. Cet arc principal (p) sert à toutes les nervures, y compris les liernes.

La ligne faîtière longitudinale s'inscrit dans un arc de cercle de rayon égal à la diagonale en plan. À l'œil nu, on croirait que la forme est brisée, ce qui dû au fait que les deux branches ont la même courbe (p). La ligne faîtière transversale n'a pas une courbe précise, de même, les deux branches sont construites avec la courbe (p).

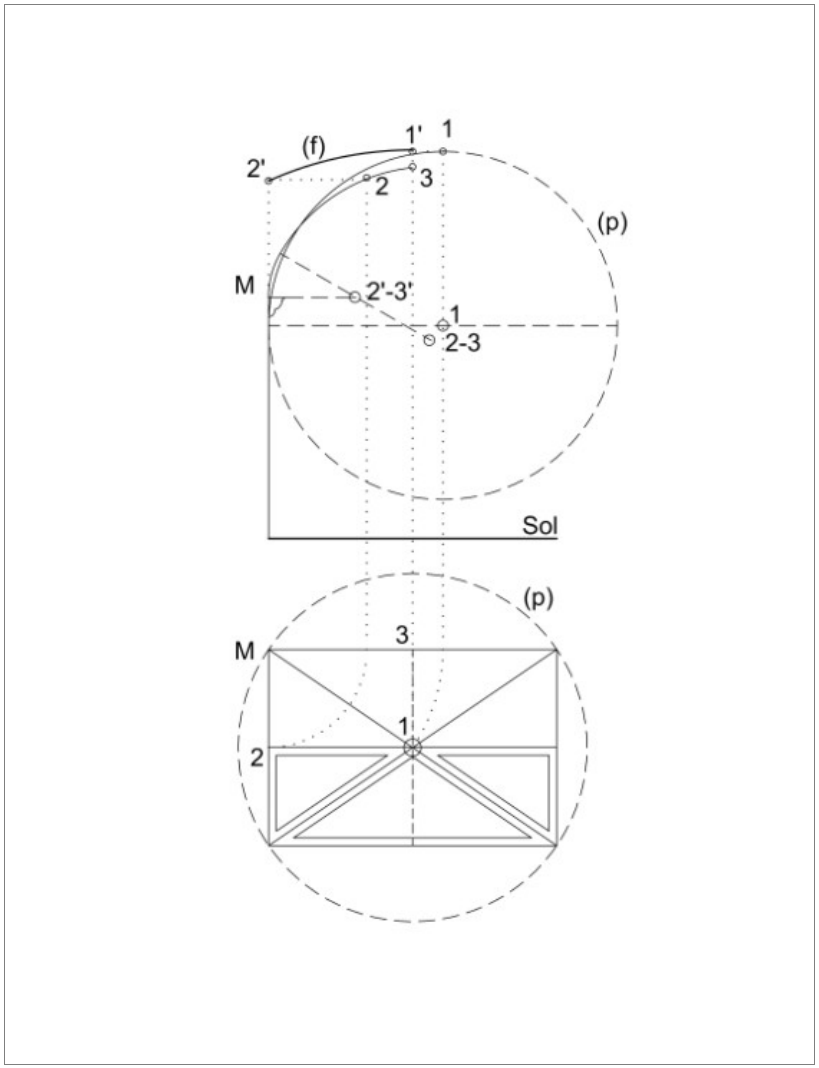
En plan, la chapelle fait 5,60m x 3,82 pour une hauteur de 7,52m.

Hypothèse de tracé

Le tracé de la voûte est simple. On trace d'abord l'arc diagonal de rayon égal à M1. Ensuite, à partir de 1, on trace la ligne faîtière longitudinale, qui donne la clef 2. Une fois que ces clefs sont pointées, il suffit de trouver le centre des nervures et de les tracer avec le rayon de (p). Les formerets M2 et M3, sont tracés avec le même arc en anse de panier, à deux centres pour démarrer tangentiellement à la verticale. La ligne faîtière transversale est égale à (p).



Figure 224. Chapelle droite de la nef de l'église matrice d'Arronches.



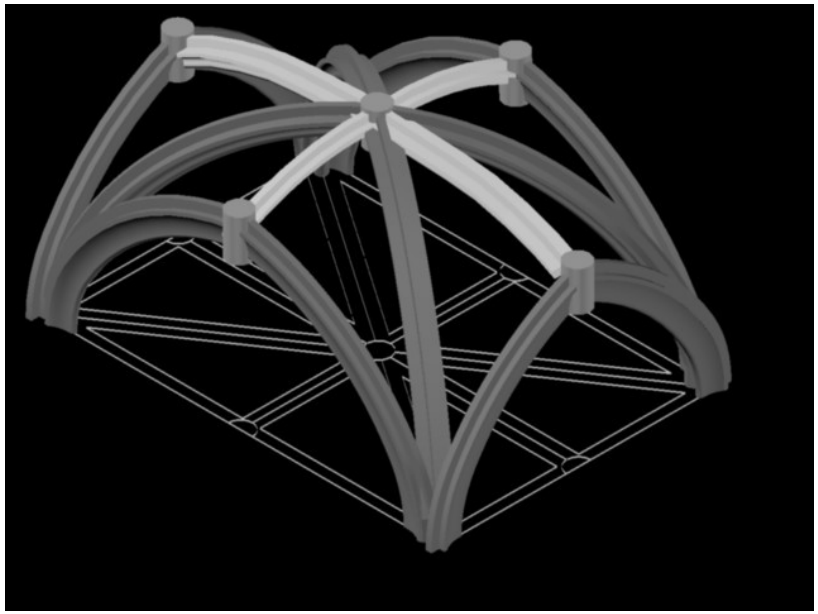


Figure 225. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle droite de la nef de l'église matrice d'Arronches.
L'arc principal (p) sert à toutes les nervures, y compris les liernes.
La ligne faîtière longitudinale s'inscrit dans un arc de cercle de rayon égal à la diagonale en plan.

Figure 226. Dessin tridimensionnel de la voûte de la chapelle droite de la nef de l'église matrice d'Arronches.

4.10.3 *Chapelle droite du chœur*

Cette chapelle possède une voûte à liernes. Les deux diagonales sont interrompues par une figure carrée centrale.

Sa forme, plus arrondie, semble plus tardive. Comme le plan est centré sur un carré, nous avons effectué un relevé pour comparer les tracés des différentes époques.

Le plan de la chapelle mesure 4,00m sur 3,62m pour une hauteur de 8,20m. Nos relevés (annexe 5-6) indiquent que les courbes des nervures sont toutes différentes entre elles, sauf les « diagonales » et les liernes. Toutes les nervures principales (diagonales, formerets et



Figure 227. Voûte de la chapelle droite du chœur de l'église matrice d'Arronches.

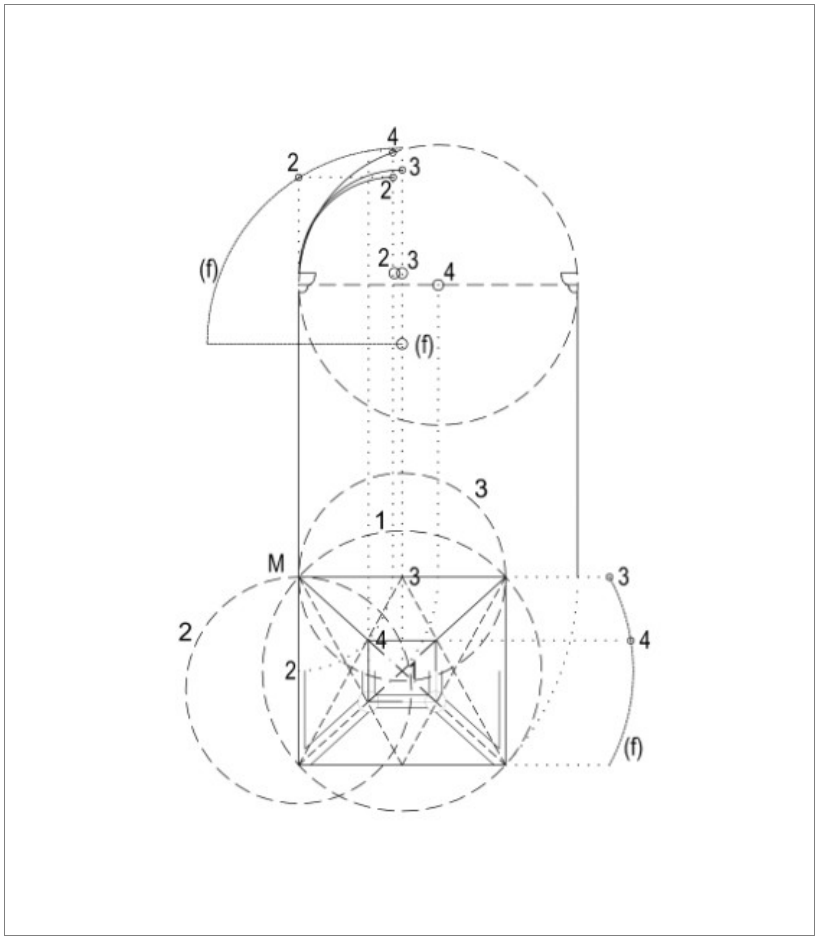


Figure 228. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle droite du chœur de l'église matrice d'Arronches.

doubleaux) sont en demi-cercle. Les diagonales sont interrompues par le carré. Les deux lignes faîtières sont des arcs de cercle dont le rayon est égal à la largeur du plan.

Les différences qu'on retrouve dans la géométrie de la voûte par rapport à la plupart des voûtes manuélines que nous avons relevées sont les suivantes : les nervures principales ne sont plus des arcs brisés mais sont remplacés par des demi-cercles ; la ligne faîtière ne correspond pas à la diagonale en plan, mais plutôt à la largeur en plan.

4.10.4 *Narthex*

Une erreur de relevé dans le plan de la tribune ne nous a pas permis de trouver le rapport entre le plan et l'élévation de la voûte. Cependant, nous présentons les résultats obtenus pour l'élévation des arcs (annexe A9-10).

Le plan est divisé en trois travées. La tribune est recouverte par une voûte surbaissée de deux croisées d'ogives sur les bas-côtés et par une voûte à tiercerons en forme d'étoile sur la travée centrale.

Dans la voûte centrale, les nervures diagonales et les tiercerons ont le même arc en anse de panier (p) naissant au même niveau. Cet arc est composé de deux rayons : le centre du rayon principal se situe plus bas que le niveau du sol et le centre du petit rayon est à 1/6 de la portée.

Le formeret transversal est également en anse de panier, mais il est composé d'autres arcs de cercles, de rayon moindre.

Les lignes faîtières sont toutes construites avec la courbe du grand arc de (p).



Figure 229. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du narthex de l'église matrice d'Arronches.

4.11 Église de Misericordia d'Arronches

4.11.1 *Nef*

La voûte de la nef de l'église de Misericordia à Arronches est similaire à celle du réfectoire du monastère de Jerónimos. C'est une voûte à liernes, en étoile à quatre branches. Elle est constituée d'ogives et des tiercerons en étoiles, ce qui produit en plan une étoile à huit branches.

Les dimensions en plan sont de 9,80m sur 6,70m et la hauteur est de 8,70m. Le relevé (annexe A11-12) permet de voir que toutes les nervures reprennent les deux arcs de cercles qui composent l'arc en anse de panier de la diagonale. La diagonale naît un niveau plus bas que les autres nervures et à 0,20m plus haut que la console. Le centre du petit arc est à 1:4 de la portée de la diagonale. La ligne faîtière transversale est courbe, de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan. Les nervures sont toutes identique en profil et en épaisseur (0,30m).

Hypothèse de tracé en plan

- Sur un plan rectangulaire, on trace les diagonales et les deux lignes faîtières. On pointe les clefs 1, 2 et 3.
- Tracer la bissectrice M4 et la droite 2-M1. À l'intersection de ces deux lignes, on pointe la clef 4. La clef 5 est à la même distance de M que la clef 3.

Hypothèse de tracé en élévation

- Diagonale : tracer la diagonale avec l'arc en anse de panier, qui montre la (Figure 231. Pointer la clef 1.
- Ligne faîtière : À partir de 1, on trace la ligne faîtière de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan. Sur cette ligne, on pointe les clefs 4 et 5 en suivant leurs distances à la clef 1 en plan.



Figure 230. Voûte de la nef de l'église de Misericordia à Arronches.

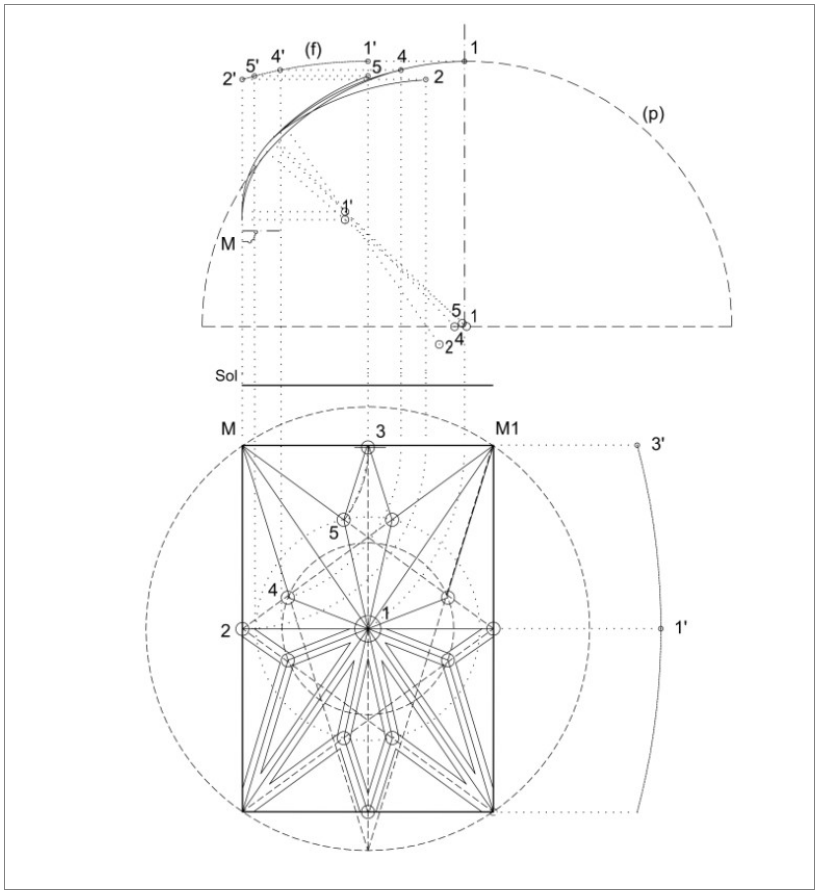


Figure 231. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la nef de l'église de Misericordia à Arronches.
Toutes les nervures reprennent les deux arcs de cercles qui composent l'arc en anse de panier de la diagonale La ligne faîtière transversale est courbe, de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan.

-

- Tiercerons et formerets : ces nervures naissent plus haut que la diagonale. Le grand arc s'élève ou s'abaisse pour arriver à la hauteur préalablement déterminée par la ligne faîtière.

Hypothèse de construction

- La construction est identique à la méthode de tracé
- Diagonale : on dispose les cintres des diagonales et l'étai de la clef centrale 1.
- Ligne faîtière : on place la cerce de la ligne faîtière transversale entre 1 et 2. Sur cette cerce, on prend les hauteurs des clefs 4 et 5, y rapportant leurs distances à la clef 1.
- Tiercerons : reprenant les hauteurs tirées de la ligne faîtière, on place les étais des clefs 4 et 5 à leur emplacement marqué sur la plateforme de travail. On place les cintres entre les clefs et le tas de charge. On procède de même pour les quatre côtés.
- Liernes : une fois que les cintres des tiercerons sont placés, on place les cerces des liernes, de même courbe que la ligne faîtière.
- On pose d'abord les clefs et ensuite les claveaux et les voussoirs depuis le tas de charge – avec le remplissage des reins - jusqu'à la clef centrale. Pour terminer, la voûte est recouverte d'un mortier de blocage.

4.11.2 *Chœur*

La voûte du chœur mesure 4,48m sur 4,08m et elle présente une forme plus arrondie que la plupart des voûtes de nos relevés. Il s'agit d'un type de voûte à tiercerons en étoile à quatre branches.

Les analyses géométriques figurent à l'annexe A13-14. La ligne faîtière est déterminée par un arc de cercle de rayon égal à la larguer de la voûte.

Les diagonales et les tiercerons ont un même arc en anse de panier dont le rayon principal vaut la moitié de la diagonale en plan. Cet arc coïncide avec la ligne de l'intrados, ce qui n'est pas courant. Nous ne trouvons aucun rapport géométrique avec les voûtes de Castilho.



Figure 232. Voûte du chœur de l'église de Misericordia à Arronches.

4.12 Église de Torre de Moncorvo

4.12.1 *Nef*

La voûte de l'église-halle de Torre de Moncorvo présente une forme en « berceau », comme celles de Freixo de Espada-à-Cinta et d'Arronches. Elle est constituée de voûtes à tiercerons (bas-côtés) et de voûtes à liernes (nef).

La courbe transversale est ici plus aplatie que dans les cas précédents et la différence de hauteur entre la nef (15,75m) et les bas-côtés (15,25m) est moindre. Le plan de 37,30m sur 19,38m est divisé en cinq travées. La hauteur de la nef vaut le double de sa largeur.

La voûte repose sur huit colonnes d'un diamètre de 1,10m. Les murs sont renforcés par des colonnes engagées à l'intérieur et par des contreforts à l'extérieur.

Les travées sont divisées par des arcs longitudinaux et transversaux. Dans les bas-côtés, les diagonales sont remplacées par deux paires de tiercerons qui se rejoignent au sommet aux liernes placés sur la ligne de faîte horizontale. Dans la nef centrale, les ogives se croisent avec un carré de liernes et la ligne faîtière longitudinale horizontale est accentuée par des liernes.

Nos relevés montrent que le principe géométrique de cette voûte est la même que pour les églises de Freixo de Espada-à-Cinta et Arronches : la hauteur des clefs centrales correspond à la demi-hauteur des diagonales. Cependant, cet arc n'est utilisé que dans les ogives de la nef. Les autres nervures présentent toutes la même courbe dont le rayon est égal à la longueur des tiercerons du bas-côté.



Figure 233. Voûte de la nef de l'église de Torre de Moncorvo.

Hypothèse de tracé en plan

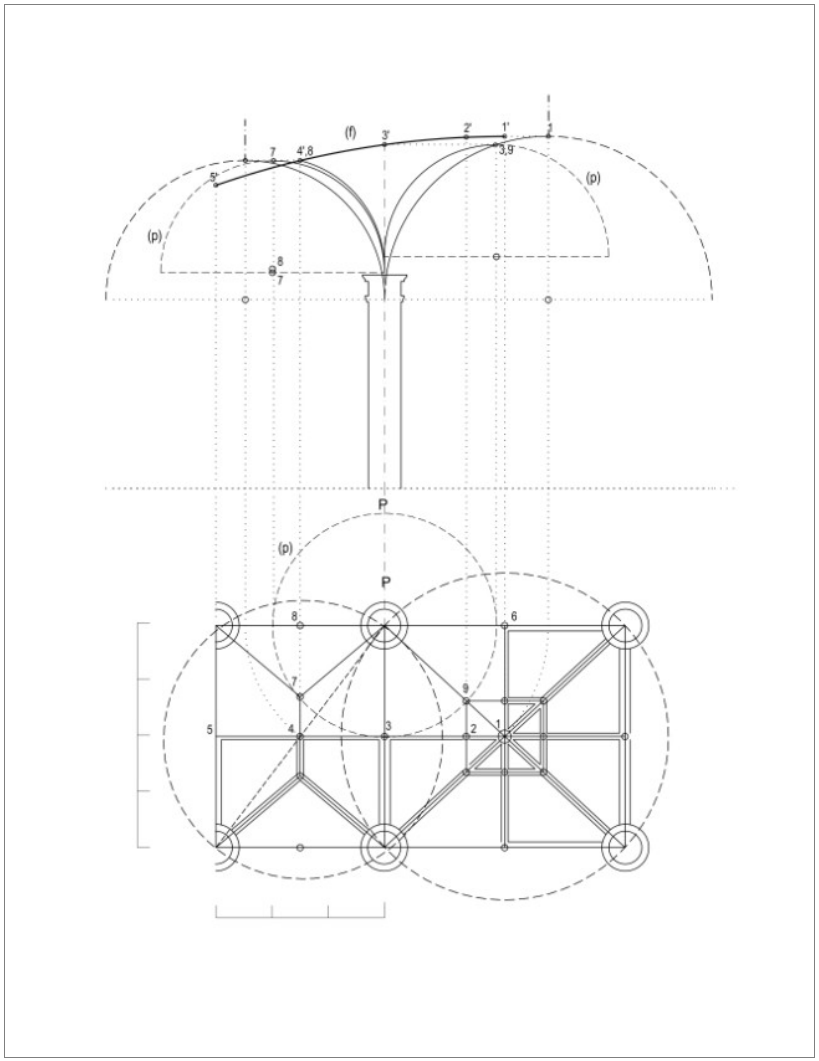
- Le plan est divisé en travées. Les bas-côtés ont une proportion de 4:3 entre la longueur et la largeur (comme Arronches et Freixo). La nef est presque de forme carrée.
- On trace les axes et les diagonales sur la nef centrale. On obtient les clefs 1, 2, 3, 5, 6 et 8.
- Avec le centre en P, on trace un arc de cercle de rayon égal à P-3. On obtient les clefs intermédiaires 7 et 9. À partir de 9, on trace le carré central.

Hypothèse de tracé en élévation

- Diagonales : on trace les diagonales en demi-cercle, dont le rayon vaut la moitié de la longueur en plan et on pointe les sommets 1 et 4. Le point 4 n'est pas une clef mais détermine la hauteur des clefs situées sur la ligne faîtière longitudinale des bas-côtés.
- Lignes faîtières : à partir des points 1, 4 et un troisième point symétrique à 4 (clef du bas-côté droit), on trace l'arc de cercle (f). Sur cette ligne, on pointe les clefs 2, 3 et 5 en projetant verticalement ses points. Les deux lignes faîtières longitudinales sont horizontales.
- Tiercerons et doubleaux : ces nervures sont tracées avec un arc de cercle de rayon égal à la longueur de P3, l'arc standard (p), qui sert à tracer P6, P7 et P8. On trace ses arcs avec leurs hauteurs tirées de (f).

Hypothèse de construction

- On trouve deux tailles de nervures : un plus épaisse, de 0,35m, pour les nervures longitudinales et transversales ; les autres nervures sont identiques en profil et en épaisseur (0,30m).
- La construction suit le même ordre que le tracé de l'élévation. La méthode de construction est identique à celle qui a été expliquée pour l'église de Freixo de Espada à Cinta et Arronches.
- Les nervures sont en pierre et les voûtains sont en briques, comme à Arronches.



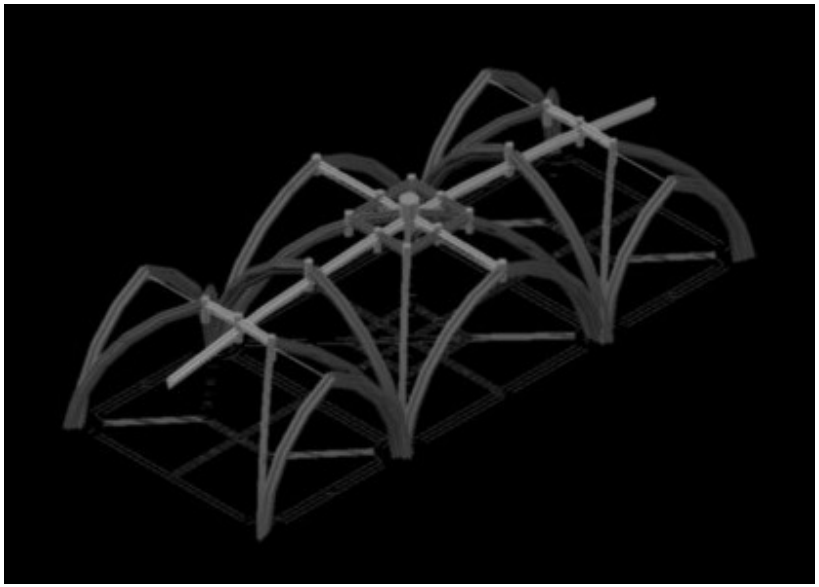


Figure 234. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la nef de l'église de Torre de Moncorvo.
La hauteur des clefs centrales correspond à la demi-hauteur des diagonales. L'arc en demi-cercle n'est utilisé que dans les ogives de la nef. Les autres nervures présentent toutes une même courbe dont le rayon est égal à la longueur des tiercerons du bas-côté

Figure 235. Dessin tridimensionnel de la voûte de la nef de l'église de Torre de Moncorvo.
La courbe transversale est en arc de cercle sur les trois nefs.

4.13 Église de Marvila

4.13.1 *Chœur*

La voûte à *combados* du chœur de Marvila présente une forme de quadrilobe en accolade. En plan, le chœur est un carré de 5,80m de côté et sa hauteur correspond au double de ce côté (11,60m). La géométrie de la voûte est simple à trouver et sa forme en élévation est évidente au premier regard. La diagonale est composée de deux arcs dont l'un part de la console et d'un autre qui relie les deux clefs intermédiaires.

En annexe, nous sommes en mesure confirmer de nouveau la standardisation de la construction. Deux arcs de cercle ont été utilisés pour les nervures. Toutes les nervures principales reprennent la forme de l'arc de cercle (p) qui circonscrit le plan et de rayon égal à la moitié de la diagonale. Les deux lignes faîtières sont tracées avec un arc de cercle de rayon valant le double de (p). Concernant l'ogive, l'arc (p) part des consoles et l'arc (f) est entre les clefs. Il en résulte une forme de coupole surbaissée au sommet de la voûte entre les clefs des tiercerons et les clefs intermédiaires des ogives. Les *combados* qui entourent cette forme sont plats en élévation, car situés presque à la même hauteur, en conséquence de la forme surbaissé des lignes faîtières.

Hypothèse de tracé en plan

- Clefs principales : à partir d'un plan carré, on trace les axes et les diagonales pour obtenir les clefs 1, 3 et 5.
- Clefs secondaires : l'intersection de la bissectrice de 1-M-3 avec l'axe 1-3 donne la clef 2. De même, l'intersection de la bissectrice 1-M-5 avec l'axe 1-5 donne la clef 4.



Figure 236. Voûte du chœur de l'église de Marvila.

- Clefs intermédiaires : la clef 6 est à la même distance de 1 que les clefs 2 et 4. On trace une droite entre les clefs des formerets 3 et 5 et à son intersection avec la bissectrice, on trouve la clef 7. De même, l'intersection entre M4 et 3-5, donne la clef 8. Toutes les clefs étant pointées en plan, on trace l'élévation.

Hypothèse de tracé en élévation

- Ligne faîtière : on trace (f) à la hauteur désirée – le double de la largeur en plan – et de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan. La hauteur de la console est à 1:3 de celle de la clef centrale. Sur (f) on pointe les clefs 1, 2 et 3.
- Tierceron : on reporte la distance M2 (égale à M4) au plan en élévation et on projette verticalement les clefs 2 et 4, jusqu'à la hauteur 2' tirée de (f). À partir de 2, on trouve le centre de l'arc principal (p) sur l'axe vertical (droite qui passe par 1) et on trace le tierceron entre M et 2.
- Diagonale : on reporte la distance M-6-1 au plan en élévation et on projette verticalement les clefs 6 et 1 jusqu'aux hauteurs définies sur la ligne faîtière. La hauteur de 1 est tirée de 1´ ; celle de 6 est tirée de 2´. À partir de 6, on trouve le centre de (p) comme pour les nervures précédentes et on trace la nervure M-6. Entre 1 et 6, le lierne est de même rayon que (f).

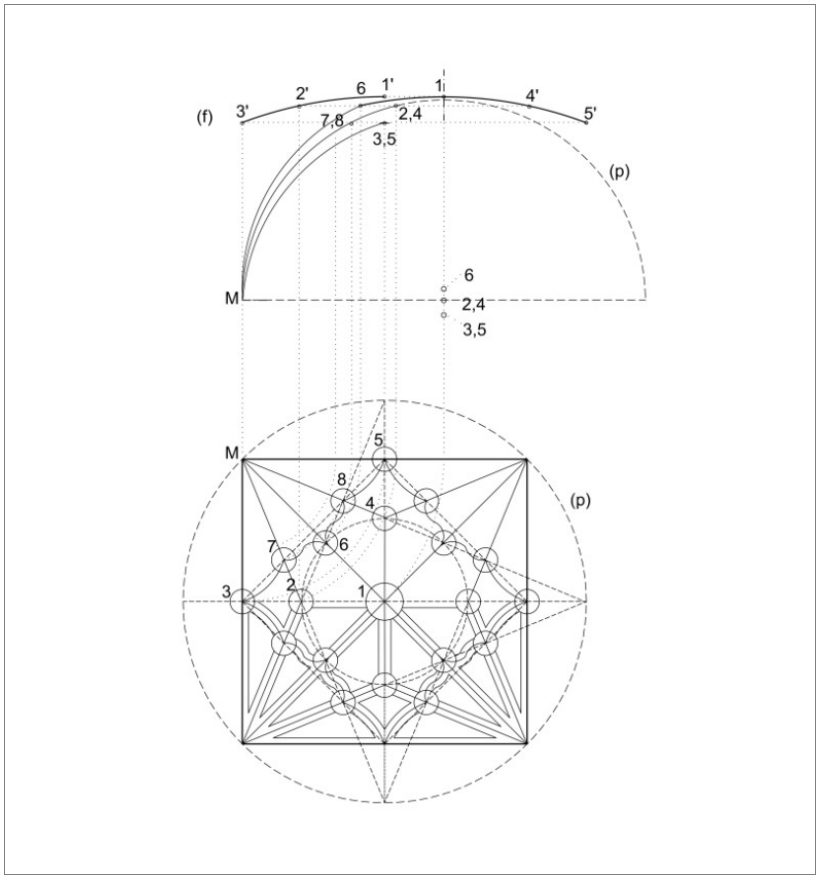


Figure 237. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du chœur de l'église de Marvila.
Les nervures principales sont tracées selon l arc de cercle (p). Les deux lignes faîtières (f) sont tracées avec le même arc de cercle de rayon valant deux fois celui de (p). La diagonale est tracée avec ces deux arcs de cercle, (p) et (f), le sommet est en forme de coupole.

Hypothèse de construction

Pour l'emplacement des cintres, les phases de construction suivent le même ordre que le tracé. Pour trouver l'emplacement des cintres, il suffit de connaître la hauteur de la clef centrale et la forme de la ligne faîtière.

- Lignes faîtières et clefs principales 1, 3 et 5 : après avoir posé les tas de charge et reproduit le plan sur la plateforme de travail, on place l'étai de la clef centrale 1 de hauteur prédéterminée. À partir de 1, on place les cerces des lignes faîtières de même rayon que (f) et on place les étais des clefs 3 et 5.
- Tiercerons et clefs secondaires 2 et 4 : au fil à plomb, on dispose les étais des clefs 2 et 4 entre les cerces et les emplacements en plan. On dispose les cintres de courbe égale à (p) entre le tas de charge et ces clefs.
- Ogives et clefs intermédiaires 6, 7 et 8 : reprenant la hauteur des clefs 2 et 4, on place l'étai de la clef 6. À partir de 6, on place un cintre de rayon égal à (p) jusqu'à M ainsi qu'une cerce de rayon égal à (f) jusqu'à 1. Pour trouver l'emplacement des clefs intermédiaires 7 et 8, il suffit de placer le fil à plomb entre les cintres et les emplacements marqués sur la plateforme de travail.
- La clef intermédiaire, qui est inclinée, semble être taillée comme un claveau. En observant les détails, on trouve parfois un mauvais raccordement entre ces clefs et les combados.
- Cette hypothèse de construction semble facile. Pour monter toute la structure en bois, il suffit de connaître la hauteur de la clef centrale, la forme de l'arc principal (p) et de la ligne faîtière (f).

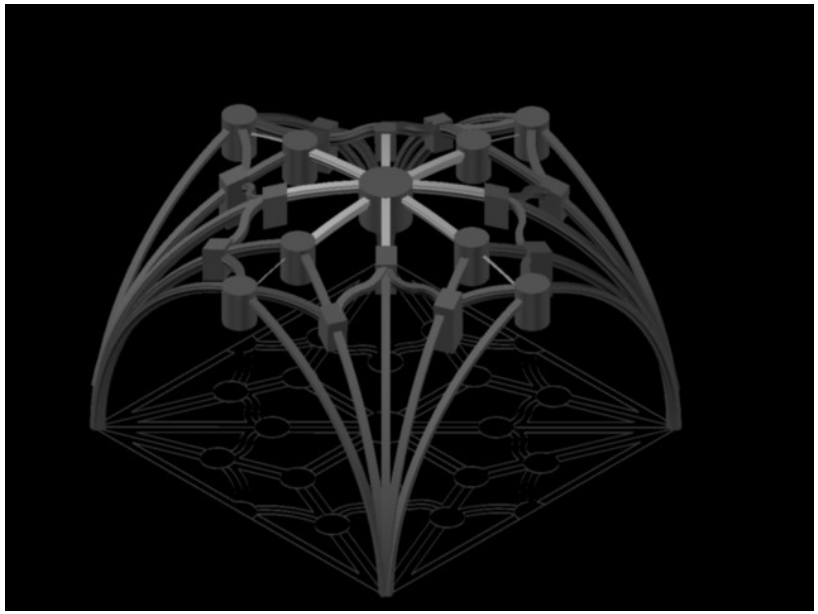


Figure 238. Dessin tridimensionnel de la voûte du chœur de l'église de Marvila. Les nervures du sommet sont construites avec la même courbure que la ligne faîtière : la voûte prend la forme d'une coupole.

4.13.2 *Chapelle gauche*

La chapelle gauche présente une voûte à tiercerons en étoile à quatre branches. Sa géométrie ressemble à celle du chœur. Le plan est presque carré (4,30m x 4,14m). L'élévation des arcs révèle l'existence d'un arc standard, de rayon égal à la demi-diagonale en plan. Les deux lignes faîtières sont identiques et leur rayon est le double du précédent. Les lignes faîtières dictent les hauteurs des arcs en s'élevant ou en s'abaissant pour atteindre le niveau de (f). Le profil des nervures est le même pour les diagonales et pour les tiercerons (0,30m), les formerets et transversale présentent une épaisseur identique, mais ils sont un peu plus larges.

Hypothèse de tracé en plan et en élévation

- Pour le plan, on trace les axes et les diagonales, qui donnent les clefs principales 1, 3 et 5 ; on trace des bissectrices, qui donnent les clefs intermédiaires 2 et 4.
- Pour tracer l'élévation, on trace la diagonale de rayon égal à M1 en plan, l'arc principal (p) ; on pointe la clef 1 ; à partir de 1, on trace les lignes faîtières dont le rayon est le double de M1 ; sur (f), on pointe les clefs secondaires 2 et 4 ; on trace les tiercerons, à partir des distances en plan et des hauteurs tirées de l'élévation, identiques à (p).

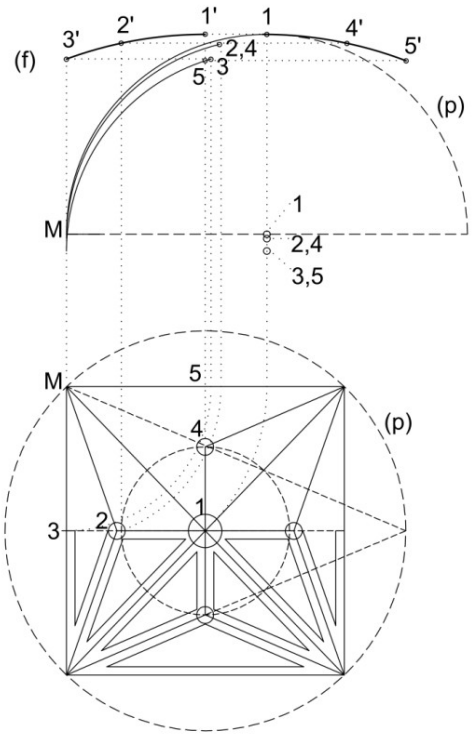
Hypothèse de construction

Structure en bois : l'ordre est le même que pour le tracé : a) on cherche d'abord l'emplacement des clefs en plan sur la plateforme de travail ; b) placer les cintres des diagonales et l'étai de la clef centrale ; c) placer les cerces des lignes faîtières et les étais des clefs secondaires ; d) finalement placer les cintres des tiercerons.

Construction de la voûte : on pose d'abord les clefs ; on pose les claveaux et les voussoirs, à partir des quatre tas de charge jusqu'à la clef centrale ; le remplissage des reins se fait aussi en simultané, pour une question de stabilité ; à la fin, on recouvre la voûte d'une couche de mortier de blocage.



Figure 239. Voûte de la chapelle gauche de l'église de Marvila. .



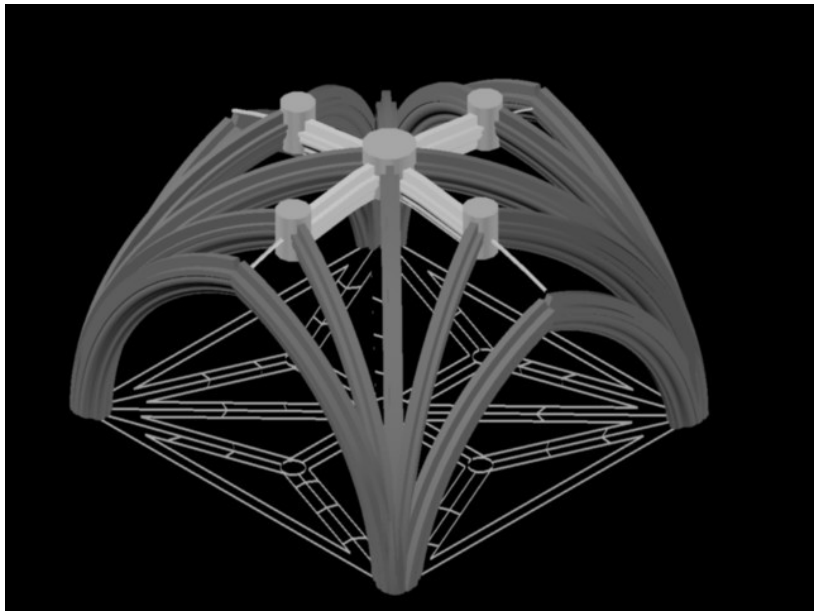


Figure 240. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle gauche de l'église de Marvila.
Un arc standardisé, de rayon égal à la demi-diagonale en plan, sert à construire toutes les nervures. Les deux lignes faîtières sont identiques et leur rayon est le double du précédent.

Figure 241. Dessin tridimensionnel de la voûte de la chapelle gauche de l'église de Marvila.

4.14 Monastère d'Alcobaça

4.14.1 *Voûte du passage vers la sacristie*

L'antichambre de la sacristie du monastère d'Alcobaça présente une voûte à liernes sur plan pentagonal. La voûte est composée de tiercerons qui convergent vers un hexagone central formé par les liernes. Les consoles ne sont pas directement reliées entre elles par des ogives. À leur place, les tiercerons et les liernes forment des paires de triangles qui se contrebutent.

La caractéristique la plus remarquable de cette voûte est son plafond plat inscrit dans l'hexagone central. Toutes ses clefs sont situées presque à la même hauteur. Ce sommet horizontal montre clairement l'objectif conceptuel de départ du projet. Il est souligné en blanc sur le dessin tridimensionnel de la voûte (Figure 244).

Nos relevés indiquent que toutes les nervures sont courbes en élévation, y compris les liernes, malgré leur apparence horizontale. Toutes ont une même courbure, excepté l'arc en plein cintre du passage vers l'église (au premier plan sur la photo), et trois nervures plus courtes, à deux centres (annexe A1-2).

La plupart des tiercerons sont de longueur égale et leurs centres sont à la même hauteur. Lorsque leur longueur diffère, elles s'élèvent ou s'abaissent afin d'atteindre le même niveau de clef. Une des nervures n'est pas tangente au mur et aboutit sans transition au niveau des reins.

En raison de sa forme irrégulière, cette voûte a fait l'objet d'un relevé complet. L'espace est délimité par cinq côtés de longueur différente dont le plus long, correspondant au mur du passage vers la sacristie, mesure 9,00m. La longueur de la voûte est de 8,54m, pour une largeur de 7,74m, en passant par la clef centrale.

La hauteur de la voûte est très proche de sa longueur : 8,58m sous la voûte. Les clefs sont pratiquement toutes à la même cote de 7,90m



Figure 242. Voûte du passage vers la sacristie du monastère d'Alcobaça.

sur l'hexagone et sur l'axe vers l'église et elles s'abaissent d'environ 0,10m à partir de la clef centrale sur les autres axes de la voûte.

Hypothèse de tracé en plan

- Les consoles M1 à M5 sont aux angles des murs.
- Centre de la voûte : on trace des perpendiculaires au côté de la sacristie (M1-M2), au mur extérieur (M2-M3) et du tabernacle (M3-M4) ; ces côtés sont inscrits dans une circonférence de centre (1) ; à l'intersection de ces perpendiculaires se trouve la clef centrale 1. Les consoles de la voûte sont à distance égale de (1), sauf M5. M1-M3 est le diamètre de la circonférence.
- Lignes faîtières : on trace l'axe principal entre le côté du passage vers l'église M4-M5 et le centre de la voûte (1) en le prolongeant jusqu'à la clef 7 de l'hexagone ; cet axe est la ligne faîtière de la voûte ; au milieu de 1-3 on trouve la clef 2 de l'hexagone.
- Hexagone : tracer le cercle de centre (1) jusqu'à la clef 2 et qu'on divise en six segments égaux pour délimiter l'hexagone ; à chaque angle, on place les autres clefs 5, 6, 7, 8 et 9 de l'hexagone.
- Tiercerons : après avoir déterminé l'emplacement des clefs de l'hexagone, on trace les nervures en commençant par les tiercerons orientés vers l'hexagone ; on note que, comme la clef (1) est centrée par rapport aux consoles, on peut tracer des tiercerons de même longueur de manière à obtenir des nervures de même courbure ; le rayon de cette courbure est proche de celui de la circonférence (p), dont nous avons établi qu'elle est la courbe principale utilisée pour construire les nervures ; il existe deux tiercerons secondaires situés sur la bissectrice avec les formerets et qui aboutissent sur deux clefs 10 et 11 .

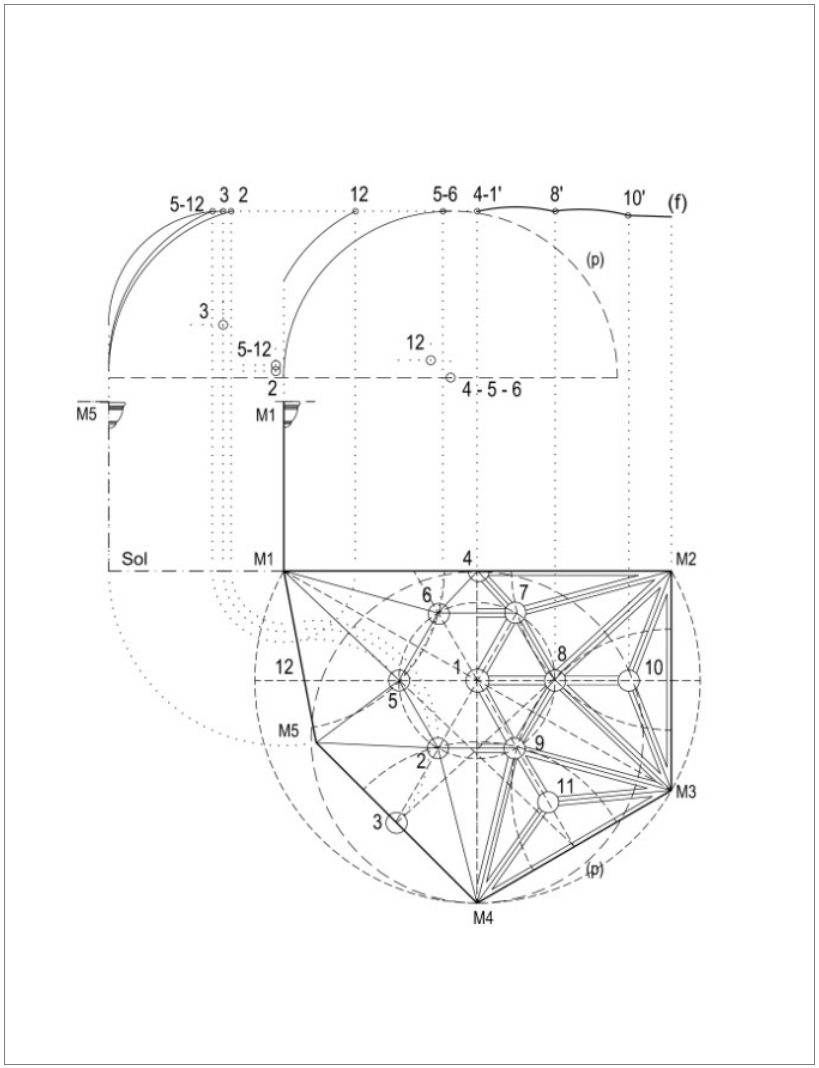
Hypothèse de tracé en élévation

Les différents éléments constitutifs du plan étant ainsi définis, on procède alors au tracé de l'élévation en suivant l'exemple des nervures qui naissent des consoles M1 à droite et M5 à gauche.

Nous avons précédemment commenté le fait que la plupart des nervures (tiercerons, formerets et liernes) présentent un arc de courbure égale à (p), excepté le plein cintre M1-M2 du passage vers l'église.

Les centres des nervures de même longueur sont coïncidents en élévation. Les nervures sont disposées de manière à rejoindre tangentiellement le mur. Parfois elles sont en anse de panier. On note cependant l'exception de la nervure M1-12, qui n'est pas tangente au mur, ce qui pourrait paraître une « erreur » de construction mais qui découle en réalité de l'utilisation d'un même arc sans tracé préalable.

- Ligne faîtière (f) : la clef 1 se situe à une hauteur égale à la largeur en plan passant par (1) ; à partir de (1), on trace la ligne faîtière horizontale qui détermine la hauteur des clefs.



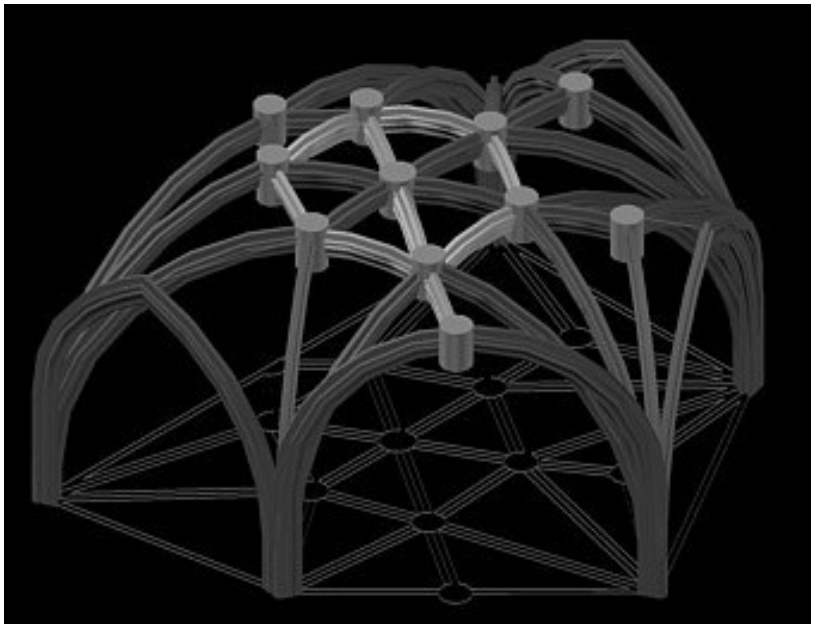


Figure 243. Hypothèse de tracé en plan et en élévation.
Voûte du passage vers la sacristie du monastère d'Alcobaça.
Toutes les nervures, y compris les liernes, ont une même courbure, excepté l'arc en plein cintre du passage vers l'église.
Un plafond plat est inscrit dans l'hexagone central.

Figure 244. Dessin tridimensionnel de la voûte du passage vers la sacristie du monastère d'Alcobaça.

- Nervures partant de M5 : on projette verticalement la console M5 à la hauteur désirée et les clefs 2, 3, 5 et 12 sur la ligne faîtière. Pour trouver le centre du tierceron M5-2 à partir de (2), on trace
- une circonférence de rayon (p) et une parallèle au mur de même
- longueur que le rayon ; à leur croisement, on pointe le centre de (2) et on trace la nervure M5-2. Pour les tiercerons des clefs 5 et 12, la procédure est la même ; leurs centres sont coïncidents vu qu'ils sont de longueur égale. M5-3 est un arc en plein cintre.
- Nervures partant de M1 : on suit une démarche identique. À partir de (5), tracer M1-5. La clef 6 est coïncidente avec (5). Pour M1-4, bien qu'un peu plus long s'agissant d'un formeret, il suffit de prolonger la nervure horizontalement sur le plan du mur, en chantier, sans besoin de tracé. M1-12 est beaucoup plus petit, son centre est plus élevé afin d'atteindre la cote de la ligne faîtière. L'arc n'est pas tangent au mur, il n'a pas fallu le tracer préalablement.
- De la même manière, on trace l'élévation de toutes les nervures, sur chaque console.

Hypothèse de construction

- Des patrons sont pris sur les tracés à l'échelle 1:1 pour tailler les pierres des tas de charge. Un seul biveau suffit pour tailler les nervures et construire les cintres avec la courbe de l'arc principal (p).
- On pose les tas de charge jusqu'au niveau de séparation des nervures et on installe la plateforme de travail.
- En tirant des cordes, on trace le plan de la voûte sur la plateforme pour trouver les axes, la clef centrale de la voûte, l'hexagone, les nervures ainsi que l'emplacement des clefs.
- Le cintre de l'arc en plein cintre M4-M5 du passage vers l'église a dû être placé en premier en fonction de la hauteur de voûte souhaitée ; on trouve l'emplacement de la clef à l'aide d'un fil à plomb (3).
- Ligne faîtière : à l'emplacement de la clef centrale (1), on place un étai de même hauteur que (3). On relie les deux clefs par une cerce sur laquelle on localise la clef (2) au fil à plomb.
- Les étais des clefs de l'hexagone sont disposés à la hauteur des clefs précédentes.
- À partir des consoles, on place les cintres des tiercerons jusqu'à l'hexagone et les cerces de tous les liernes de même courbure qui les relient ; une fois que la structure en bois est terminée, l'ensemble est stable.
- On commence à poser les pierres : on appareille d'abord les voûtains avec leur remplissage jusqu'à la limite de l'hexagone, simultanément à partir de chaque console pour ne pas déséquilibrer la structure. Lorsque tous les cotés sont terminés, on réalise l'hexagone central.
- Toutes les nervures sont de même profil, sauf quatre qui semblent

provenir d'un autre chantier. Elles présentent une épaisseur identique de 0,31m qui confère sa continuité à la voûte.

- Toutes les clefs sont verticales et dépourvues de branches et sont donc faciles à tailler.

Au niveau des tas de charge de l'arc du passage vers l'église, on note que la partie supérieure des consoles se termine en forme de cône, ce qui donne plus d'élégance à la voûte. Ce détail rend les consoles plus discrètes. La naissance des nervures en est également plus progressive.

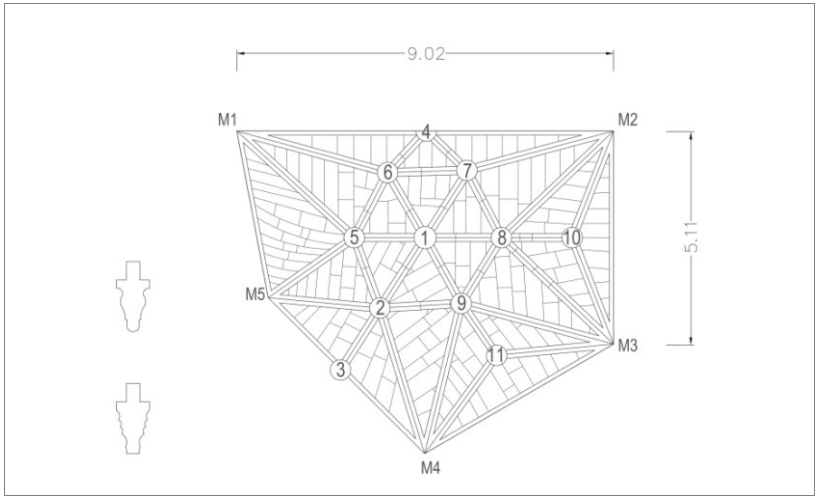


Figure 245. Plan des voussoirs et profils de nervures de la voûte du passage vers la sacristie du monastère d'Alcobaça.
Les nervures présentent un profil identique (en haut), excepté trois tiercerons qui semblent provenir d'un autre chantier. Leurs épaisseur est de 0,31m.

4.15 Monastère Santa Maria da Victória, Batalha

4.15.1 *Voûte tournante*

La voûte tournante du monastère de Batalha est située entre l'église et les chapelles *imparfaites* (*capelas imperfeitas*, au sens d'inachevées) aussi appelées : la rotonde.

La voûte tournante est délimitée comme suit : un mur longitudinal de 21,88m (AB représente la moitié), qui sépare la voûte de la rotonde, des murs latéraux (B) de 11,14m avec, au centre, le mur et contreforts du chœur circulaire.

La caractéristique plus frappante de cette voûte est sa ligne faîtière horizontale qui suit le pourtour des murs du chœur. Selon nous, l'objectif premier du projet a été de souligner et d'accentuer le chemin d'accès à l'église. Pour atteindre cet objectif, Castilho a créé une voûte à liernes qui élargit la surface horizontale au sommet et qui crée une forme continue et ininterrompue de nervures, toutes de même profil, une forme grâce à laquelle la division en travées est imperceptible (Figure 246).

Nos relevés (annexe A1-2) ont établi que la ligne faîtière et toutes les clefs de la voûte sont à une même hauteur (13,63m) et que les voûtains entre les liernes sont plats. L'arc transversal en plein cintre est l'arc principal (p), le premier arc sur l'image en 3D, qu'on retrouve dans toutes les nervures à l'exception de quatre nervures en anse de panier.

On retrouve l'arc transversal (p) au niveau des nervures qui ont la même longueur que lui ou qui sont légèrement plus courtes. Ces nervures ne diffèrent entre elles que par la hauteur de leur naissance, laquelle est plus élevée pour les nervures courtes de manière à atteindre la même hauteur de clef que les nervures plus longues. Ces différences de niveau des naissances de nervures sont vérifiables par observation sur place au niveau du tas de charge.



Figure 246. Voûte tournante du monastère de Batalha

Cette disposition du sommet implique que les nervures plus longues sont surbaissées suivant un arc à 3 centres. Il est intéressant de voir que le grand cercle et le petit cercle de cet arc ont également été réutilisés pour d'autres nervures. Les liernes reprennent aussi la courbure de ce grand arc ; elles ne sont donc pas plates comme on pourrait le penser.

On observe qu'il existe un rapport constant entre le plan au sol et l'élévation : à une même longueur de nervure en plan correspond un arc déterminé. En dessinant le plan, on tient compte de l'élévation des arcs, comme nous allons le constater.

Hypothèse de tracé en plan

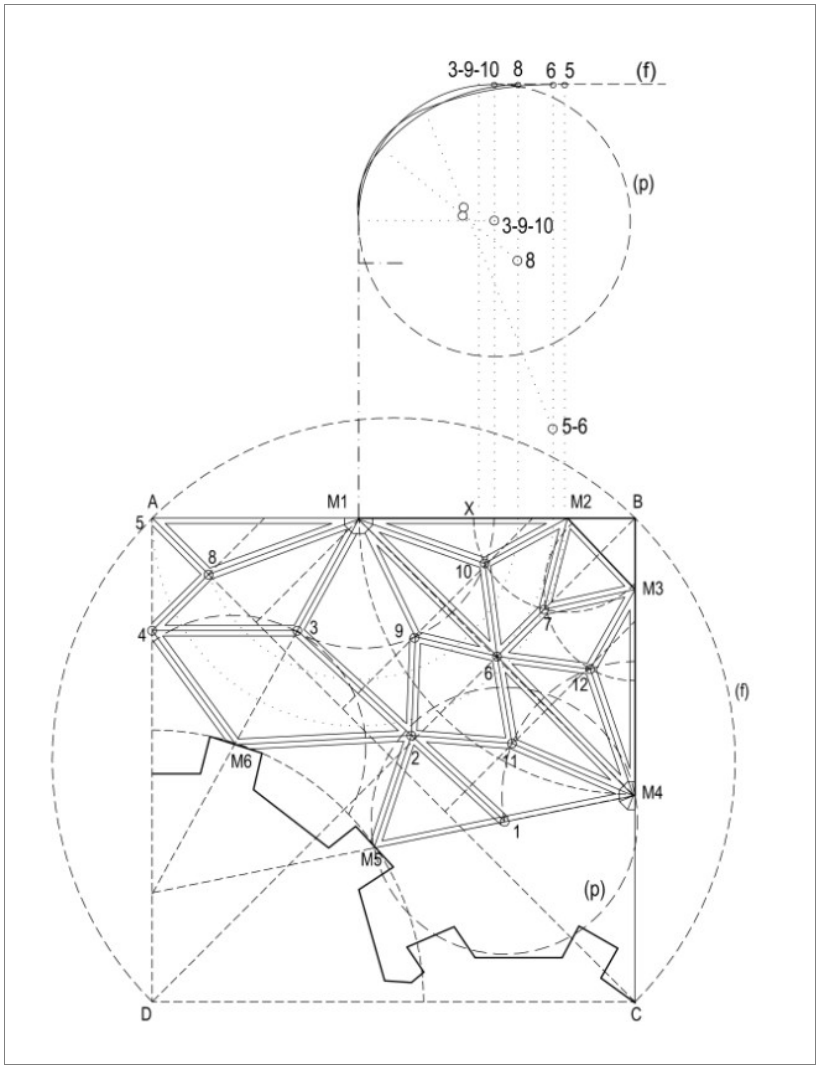
Notre Figure 247 représente un module qui correspond à la moitié de la voûte dont nous avons fait le relevé. Commençons par le tracé en plan.

- Le plan s'inscrit dans un carré ABCD ; on trace AD suivant l'axe longitudinal de l'église, D correspondant au centre du chœur ; ce carré est la base du plan.
- Faîtières - On trace la diagonale BD du carré pour trouver la faîtière transversale de la voûte. La faîtière longitudinale ne sera pas encore tracée, mais suivra parallèlement le mur du chœur à partir du centre de l'axe AD, la clef 4 (idée de départ).
- Les consoles M5 et M6 sont situées dans l'axe des contreforts du chœur, suivant une disposition normale ; pour trouver l'emplacement des consoles opposées, on trace un cercle de centre B, de même rayon que le cercle délimitant le chœur, de manière à obtenir les points M1 et M4 ; deux autres consoles M2 et M3 sont situées entre M1 et M4 surmontant la trompe d'angle B ;
- Arcs principaux : entre les consoles, on trace les arcs transversaux M1-M6 et M4-M5 ainsi que l'arc longitudinal M1-M4 ;
- Clefs principales – On place les clefs d'arc 1, 3 et 6 au centre de chacun des arcs précédents : la clef 4 est sur l'axe transversal. Entre les clefs 1 et 3, on trace l'axe longitudinal de la voûte ; en prolongeant cette ligne parallèlement au chœur, on trouve la clef 4 à l'intersection avec AD. La clef 2 est au croisement des deux axes (transversal et longitudinal) de la voûte ; les clefs principales des lignes faîtières de la voûte sont maintenant tracées longitudinalement (clefs 1, 2, 3, 4) et transversalement (clefs 5, 6 et 7).

Avec ces éléments, on aurait pu faire une voûte traditionnelle en croisée d'ogives et à faîtières horizontales. Les surfaces plates au sommet de la voûte ont été obtenues en multipliant les nervures, en rajoutant des tiercerons et des liernes ; les liernes disposés à la même hauteur que les faîtières permettent voûter un sommet plat.

Comment tracer les liernes, les tiercerons et les formerets ? Nous allons le voir, il s'agit d'un compromis entre le plan et l'élévation.

- On trace d'abord les nervures de même longueur que M4-1 (nervure standardisée) et on trace des cercles de même rayon que (p), à partir des consoles.



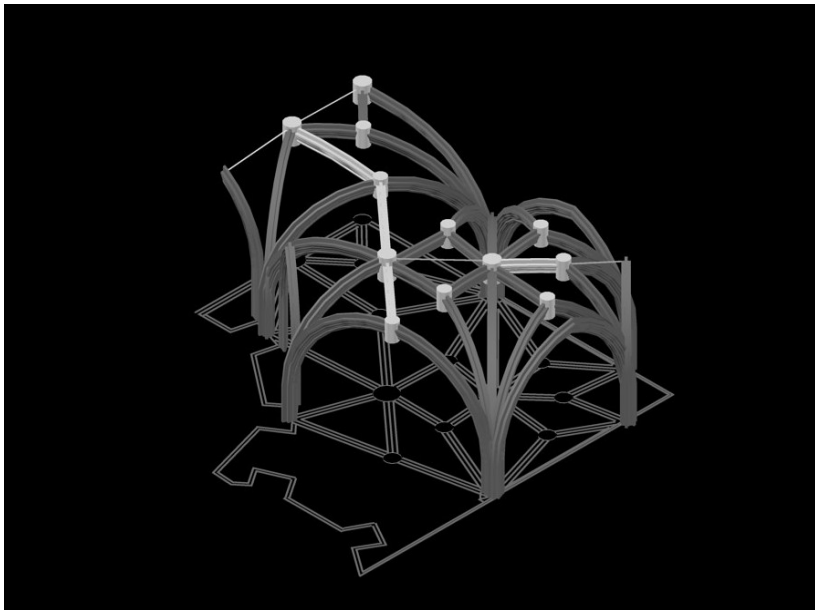


Figure 247. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte tournante du monastère de Batalha.
L'arc transversal en plein cintre est l'arc principal (p), qu'on retrouve dans toutes les nervures à l'exception de quatre nervures en anse de panier : M1-5, M1-8 M1-6 et M4-6.

Figure 248. Dessin tridimensionnel de la voûte tournante du monastère de Batalha. La ligne faîtière longitudinale souligne l'axe de l'accès à l'église. Des liernes horizontaux élargissent la surface plate de la voûte.

- Sur l'angle B, on trace des cercles plus petits, de même rayon que la trompe pour déterminer la longueur des nervures qui partent de M2 et M3. Les clefs 10 et 12 se trouvent à l'intersection de ces deux cercles.
- En traçant parallèlement à la diagonale BD des lignes qui passent par les clefs 10 et 12, on obtient les clefs 9 et 11 à leur intersection avec les cercles de centre M1 et M4.
- La clef 8 se trouve à l'intersection de la diagonale AC avec la perpendiculaire qui passe par la clef 4.
- Une fois définis les tiercerons et leurs clefs, on trace les liernes qui les relient.

Hypothèse de tracé en élévation

Maintenant que le plan est défini, voyons quel a pu être le tracé des nervures en élévation. Considérons par exemple celles qui partent de la console M1.

- Arc principal : on trace d'abord l'arc transversal M1-M6 en demi-cercle. On pointe la clef 3.
- Faîtière : sur la clef 3, on trace la faîtière horizontale, qui détermine la hauteur des clefs et des arcs de toute la voûte.
- Les nervures M1-9 et M1-10, de même longueur, reprennent la courbure de l'arc (p) (leurs centres son coïncidents).
- Le formeret M1-X : nos relevés montrent que sa courbure est la même que celle de (p). Reprenant sa longueur en plan, on projette verticalement son sommet X sur la faîtière. Avec un compas de même ouverture, on trouve le centre Cx, plus haut et on trace la nervure M1-X. Telle est la méthode qui aurait été utilisée pour les nervures plus courtes que M1-1.
- Traçons l'arc M1-6 en anse de panier. Nos relevés indiquent que son plus grand cercle est celui du cercle (f), qui délimite le plan. On prend d'abord la longueur M1-6 du plan et on la projette verticalement. À l'aide du rayon de (f), on trace l'arc supérieur de M1-M4. On trace ensuite le petit arc qui est tangent à l'arc et au mur.

La courbure de la nervure M1-5 est identique à l'arc précédent M1-M4.

- On trace la nervure M1-8 en utilisant le même petit cercle de l'arc M1-5 et un grand cercle pour la partie supérieure.

Hypothèse de construction

Une fois que les nervures sont déterminées en plan et en élévation et que les dessins sont tracés à l'échelle 1/1 sur le mur ou au sol, il est possible d'en tirer des modèles-patrons pour tailler toutes les pierres et pour construire les cintres, comme nous l'avons expliqué pour la voûte de la sacristie de Jerónimos.

- Nervures : le profil est le même pour toutes les nervures (Figure 249). On utilise (p) pour la plupart des nervures, (f) pour les

liernes et pour deux des anses de panier.

- Les tas de charge sont taillés avec deux arcs de cercles, dont (p).
- La taille des clefs est simple : celles-ci sont presque toutes cylindriques, avec de petites branches verticales ;

Partant du principe que les cintres sont réutilisés, cette voûte a pu être construite par travée, entre les paires d'arcs transversaux.

Montage de la voûte (travée latérale entre M1-M6 et M4-M5) :

- Les tas de charge sont appareillés lit par lit jusqu'au niveau de séparation des nervures et ils restent en attente comme on peut le voir sur la partie de voûte interrompue, à la fin de la travée .
- On installe une plateforme de travail, sur laquelle est reproduit le plan qui permet de déterminer l'emplacement de toutes les clefs.
- Les premiers cintres à être posé sont ceux des arcs transversaux M1-M6, M4-M5, l'arc principal (p).
- À l'aide d'un fil à plomb, on détermine l'emplacement des clefs centrales à partir du plan ; cette hauteur de clef sera réutilisée pour toute la voûte.
- On peut placer la cerce qui maintient la faîtière longitudinale entre 1 et 3 ; sur cette faîtière, on localise et place l'étai des clefs 2 et 4.
- On place les autres étais de même hauteur.
- Pose des cintres de l'arc longitudinal M1-M4 et des tiercerons, jusqu'aux clefs.
- Pose des cintres entre les étais, pour les liernes ; tout le réseau reste lié et stable ;
- Pose des pierres qui ont été taillées, d'abord les clefs et ensuite les claveaux des nervures, les voûtains et le remplissage, en partant des six tas de charge jusqu'au sommet, en remplissant les reins simultanément afin d'assurer la stabilité de la structure ;
- Dernière étape : pose des voûtains entre les liernes, là où la surface est plate, entre des clefs 3-4-5, 3-6-1 et 6-10-6-12.

Une fois que cette travée est terminée, les cintres sont retirés et remontés dans la travée suivante. Lorsque toutes les travées sont terminées, on les recouvre d'une couche de mortier de chaux afin de consolider toute la structure.

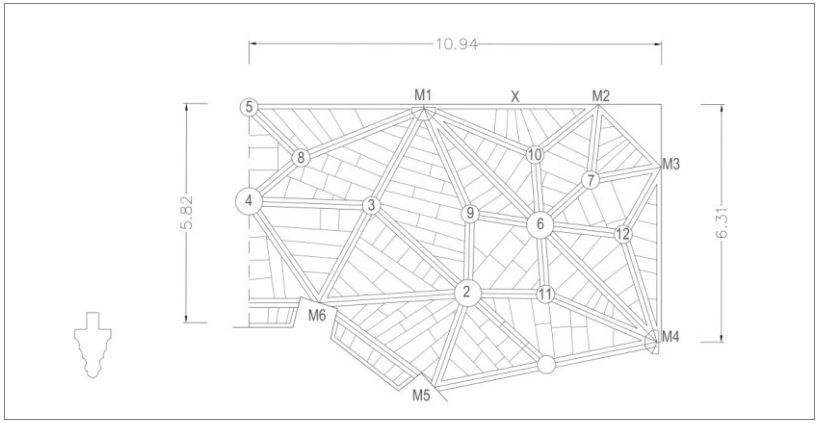


Figure 249. Plan des voussoirs de la voûte tournante du monastère de Batalha. Les nervures présentent un profil identique et une épaisseur de 0,32m.

4.16 Couvent du Christ, à Tomar

4.16.1 *Église*

L'église du couvent du Christ est divisée en trois travées, dont deux sur la tribune. Elle est recouverte par des voûtes à *combados* à quadrilobe en accolade. Ces nervures ont été taillées pour imiter des cordages. En plan, chaque travée mesure 9,53m sur 8,60, pour une hauteur de 13,06m. Le sommier de la console est à 8,03m.

Sur la photo (Figure 250), on observe que la voûte n'est pas continue entre les travées. Cependant, chaque travée a une forme arrondie très régulière et uniforme. Les travées sont nettement individualisées par des nervures transversales en forme d'arc brisé. La nervure transversale est la plus marquée, avec une épaisseur de 0,40m, suivies des diagonales (0,35m), des tiercerons, formerets et liernes (0,25m). La nervure transversale est parfois accentuée, en saillance par rapport aux ornements au niveau des tas de charge.

Toutes les clefs sont verticales et ont des petites branches. Les branches de raccordement avec les *combados* sont plus longues. Les clefs intermédiaires des diagonales et des tiercerons sont ornées de motifs décoratifs.

D'après nos relevés (annexe PT-Sa6), un arc principal a servi pour toutes les nervures, y compris les lignes faîtières. Cet arc a un rayon égal à la moitié de la diagonale en plan. Les deux lignes faîtières sont courbes et leur rayon est égal à la longueur de la diagonale en plan.

Hypothèse de tracé en plan

- Sur le rectangle de la travée, on trace les deux axes, longitudinal et transversal, et les deux diagonales. On obtient ainsi la clef centrale (1) et celles des arcs formerets et transversaux (3 et 5).
- On trace deux bissectrices sur chaque consoles ; de leur croisement avec les lignes précédentes, on obtient les autres clefs (2, 4, 6, 7 et 8).



Figure 250. Voûte de l'église du couvent du Christ, à Tomar

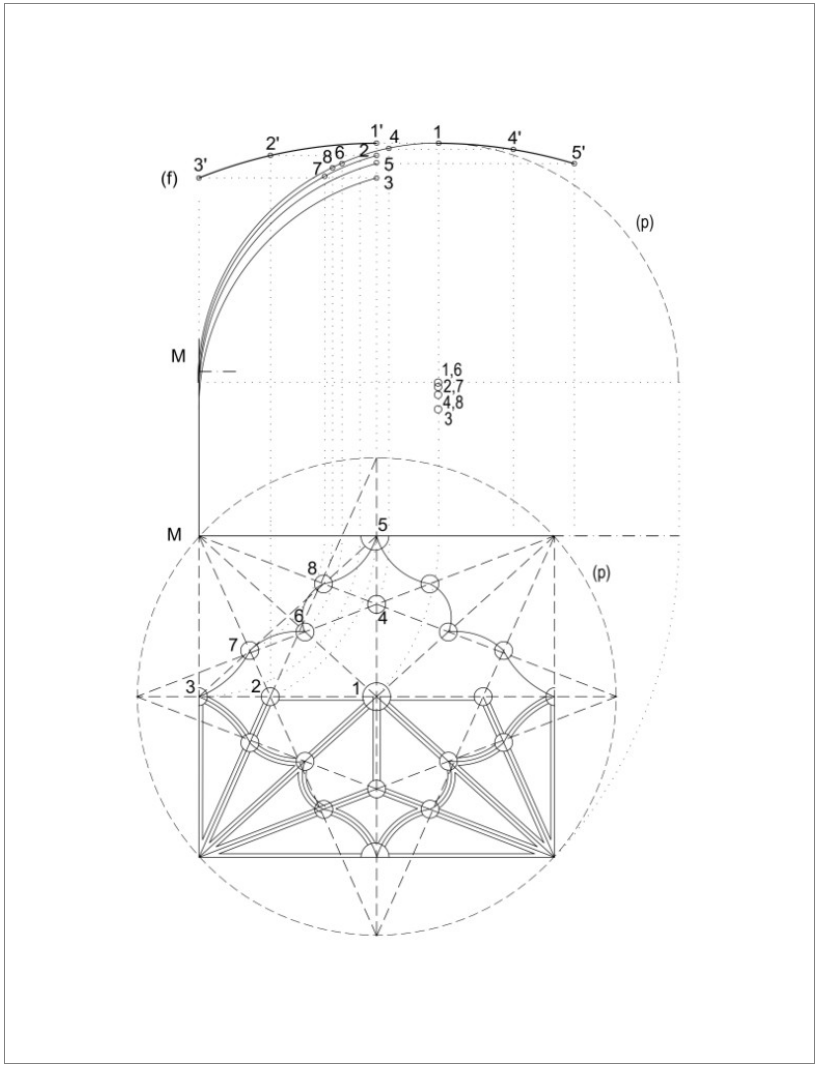
Hypothèse de tracé en élévation

- Hauteur : la hauteur sous la voûte correspond au diamètre de l'arc (p) dont le centre est situé 0,50m plus bas que la console M.
- Ogive : on reprend la longueur M-1 en plan et on la reporte en l'élévation ; on trace l'arc de cercle de rayon (p) et on trouve la clef (1). L'arc de l'ogive est un demi-cercle.
- Lignes faîtières (f) : à partir de (1') on trace la faîtière transversale, qui est un arc de cercle de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan ; on projette verticalement les clefs et on pointe (2') et (3'). À partir de (1) on trace une courbe identique pour la ligne faîtière transversale ; on pointe les clefs (4') et (5') la même méthode précédente.
- Tiercerons : on reprend la distance de M-2 du plan, on la reporte en élévation et on projette verticalement la clef (2) jusqu'à la hauteur tirée de (2'). À partir de (2'), on trouve le centre du tierceron M-2 et on trace l'arc de cercle de même rayon que (p).
- Clefs intermédiaires 6, 7 et 8 : du plan, on reprend les distances des clefs jusqu'à M, on reporte les distances en élévation et on projette verticalement les clefs jusqu'à trouver leurs emplacements sur les arcs correspondants.

Hypothèse de construction

Une fois tracées les nervures principales, les ogives et les tiercerons, on crée des modèles pour tailler les claveaux. Les nervures ont des profils distincts, mais elles sont toutes de même rayon que (p), ce qui facilite la taille des claveaux et la construction des cintres. La voûte a probablement été construite par travée. Voyons une hypothèse de construction :

- Les premiers cintres à être posés sont ceux des diagonales, en plein cintre.
- À l'aide d'un fil à plomb, on détermine l'emplacement de la clef centrale (1).
- À partir de la clef (1) on place la cerce des lignes faîtières longitudinale et transversale, de courbure identique, comme nous l'avons vu.
- À l'aide d'un fil à plomb, on détermine l'emplacement des clefs sur les lignes faîtières et on place des étais qui serviront à poser les clefs.
- Une fois trouvé l'emplacement des clefs, on dispose les cintres des tiercerons.
- La structure en triangles est alors stable et on peut commencer à poser les pierres, d'abord les clefs et ensuite les claveaux et les voussoirs à partir du tas de charge. On effectue simultanément le remplissage des reins.
- En arrivant aux *combados*, on pose les claveaux et les clefs intermédiaires et ensuite les *combados* dans la maçonnerie. Les voussoirs sont disposés de manière parallèle aux murs, même dans la zone centrale. (Figure 253)



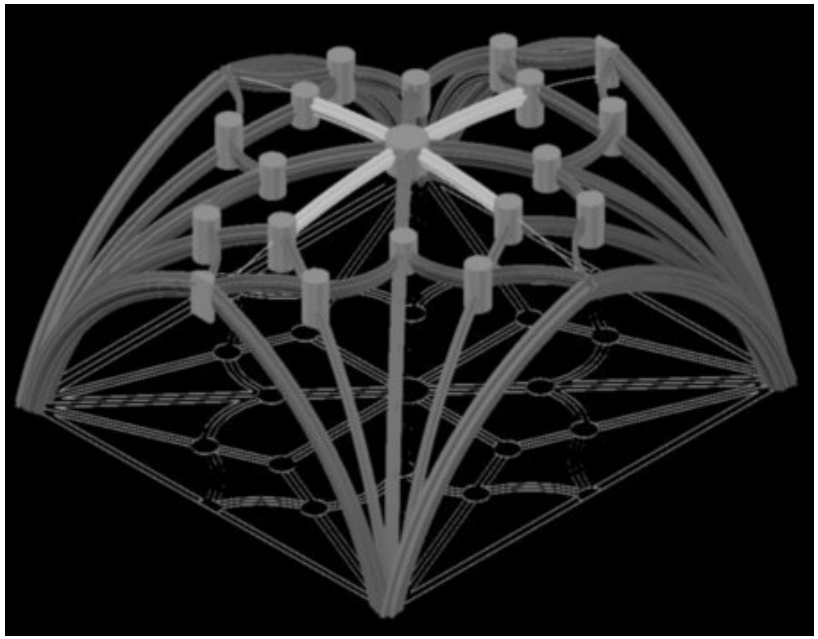


Figure 251. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de l'église du couvent du Christ, à Tomar.
L'arc principal (p) circonscrit dans le plan sert à construire toutes les nervures, y compris les liernes. Les deux lignes faîtières sont courbes et leur rayon est égal à la longueur de la diagonale en plan.

Figure 252. Dessin tridimensionnel de la voûte de l'église du couvent du Christ, à Tomar.

- Finalement, on appareille le sommet jusqu'à la clef centrale. On décintre et on passe à la travée suivante. Une couche de mortier de chaux de blocage recouvrira la toute la voûte pour consolider la structure.

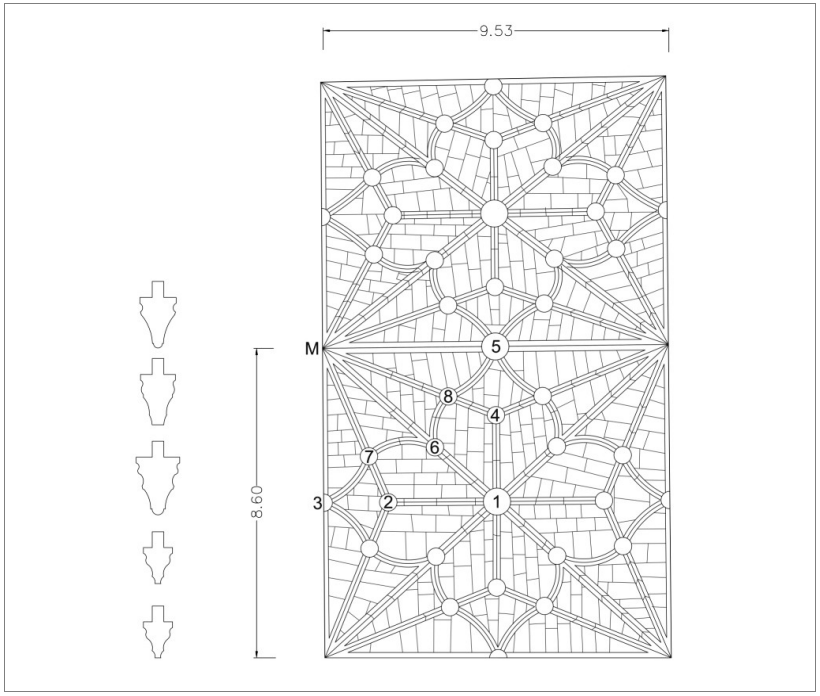


Figure 253. Plan des voussoirs de la voûte de l'église du couvent du Christ, à Tomar.
Les nervures présentent plusieurs profils et épaisseurs distincts. De haut en bas : diagonales (0,35m); longitudinales (0,35m); transversales (0,40m) ; tiercerons et formerets (0,25m); liernes (0,25m).



Figure 254. Croisement des nervures au tas de charge.
Cloître Santa Barbara.



Figure 255. Crampons métalliques.
Cloître Santa Barbara.

4.16.2 *Cloître Santa Bárbara*

Le cloître Santa Bárbara se trouve entre le cloître principal et le cloître hospitalier. Il est dans l'axe est-ouest du couvent, comme l'église et le corps principal des dortoirs. C'est un petit cloître sur plan carré de trois travées de chaque côté.

Chaque travée est recouverte d'une voûte plate à croisée d'ogives. Entre les travées, à la place de l'arc doubleau, on trouve un linteau horizontal constitué d'un seul bloc de pierre qui repose sur les consoles des murs. Les tas de charges des diagonales et des formerets sont également constitués d'un seul bloc de pierre ornementé et leur raccordement avec les arcs est courbe.

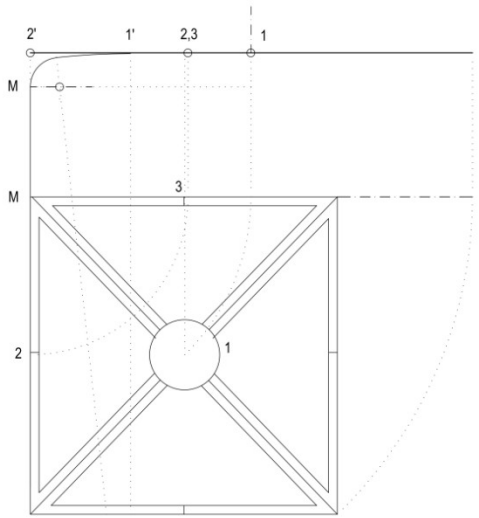
La travée que nous avons relevée mesure 2,53 m sur 2,45 m. La hauteur de la voûte est de 3,46 m, similaire à la longueur de la diagonale en plan. La hauteur de la console est de 3,19m, la flèche est d'à peine 0,27m.

Nos relevés indiquent que les « doubleaux » et les ogives présentent à leurs extrémités un arc à deux centres, une courbe de grand rayon dont le centre est plus bas que le sol et une petite courbe tangentielle au mur. (annexe A63-64). Nous remarquons que les ogives se croisent juste au-dessus du tas de charges, ce que nous avions évoqué au chapitre historique et qui serait une caractéristique de João de Castilho.

La forme de la voûte plate a dû produire des contraintes au sein du matériau car des fissures sont apparues aux extrémités des doubleaux, où on retrouve des crampons en fer posés lors de restaurations. Il est intéressant de constater que ces fissures se produisent aux endroits d'éventuels joints, et leur inclinaison est celle qu'on trouve dans les doubleaux à trois pièces.



Figure 256. Voûte du cloître Santa Bárbara - Couvent du Christ, Tomar.



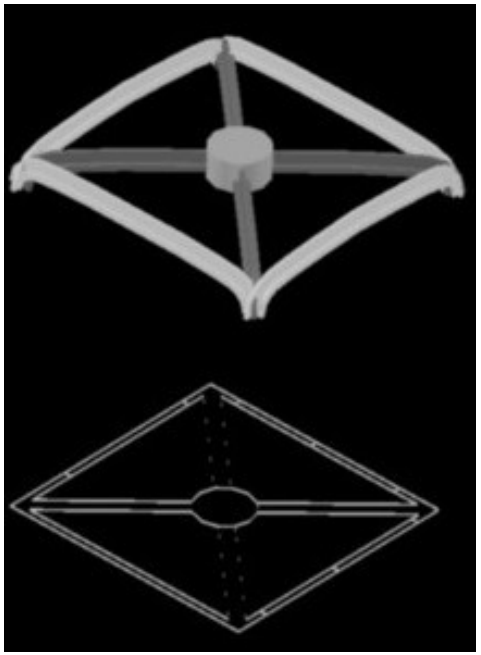


Figure 257. Hypothèse de tracé en plan et en élévation.
Voûte du cloître Santa Bárbara du couvent du Christ, à Tomar.

Figure 258. Dessin tridimensionnel de la voûte du cloître Santa Bárbara.

Hypothèse de tracé en plan et en élévation

Pour tracer le plan, il suffit de tracer les diagonales et de pointer la clef centrale.

Pour tracer l'élévation, on projette verticalement la clef (1) jusqu'à la hauteur prédéterminée qui est égale à la longueur de la diagonale en plan. On trace ensuite deux arcs de cercle tangents entre eux. Le premier de grand rayon (5,40m), et le deuxième de très petit rayon (0,23m).

Hypothèse de construction

On construit d'abord les consoles des murs d'une seule pièce. On pose les arcs doubleaux également constitués d'une seule pièce. On pose les tas de charges des ogives et formerets d'une seule pièce correspondant à la partie courbe des arcs. Sur la plateforme de travail, on pose un étai pour la clef centrale et on pose la clef. Sur les tas de charge, on place les formerets et les branches d'ogive, également d'une seule pièce, sans qu'il faille disposer des cintres. Par contre, les voûtains en briques ont probablement eu besoin d'un support.

4.16.3 *Cellier*

Le cellier du couvent du Crist est un espace de plan quasiment carré de 13,72 m sur 12,97 m divisé en neuf travées par 4 piliers centraux.

Chaque travée est recouverte d'une voûte en croisée d'ogives. Les doubleaux imposent leur présence de par leur largeur et ils séparent visuellement les travées. Les deux lignes faîtières sont matérialisées par des nervures. L'aspect le plus frappant de cette voûte est sa forme surbaissée produite par ses arcs en anse de panier.



Figure 259. Voûte du cellier du couvent du Christ, à Tomar.

Nos relevés indiquent que la hauteur de la clef centrale est à 1:2 d'un demi-cercle tracé sur la diagonale et que la console est à 1:3 de la hauteur totale de la voûte (4,34 m). Le centre principal de la diagonale en anse de panier (p) est au niveau du sol. L'arc transversal est un arc identique à (p). L'arc longitudinal est constitué d'un petit arc identique à celui de (p) et d'un arc de cercle qui correspond à la longueur de la demi-diagonale en plan. La ligne faîtière longitudinale présente une courbe identique à la circonférence circonscrite dans le plan général du cellier. (annexe A65).

On remarque les détails de la taille des clefs, qui sont cylindriques et dépourvues de branches. À la hauteur des tas de charge on retrouve des vestiges du tracé établi pour la taille des sommiers, la ligne de l'extrados des nervures.

Hypothèse de tracé en plan et en élévation

Ce plan est simple à tracer. Il suffit de tracer les deux diagonales et les deux lignes faîtières. On trouve ensuite l'emplacement de toutes les clefs.

Pour tracer l'élévation, on pointe d'abord la clef (1) à1a hauteur de voûte désirée (1:2 du demi-cercle) et le chapiteau à 2:3 de la hauteur de la clef 1. On trace l'anse de panier de la diagonale, dont le centre est au sol et dont le petit arc est centré à 1:10 de la portée. On projette verticalement la clef 2 sur cet arc. À partir de (1), on trace la ligne faîtière (f) avec la courbe de la circonférence que circonscrit le

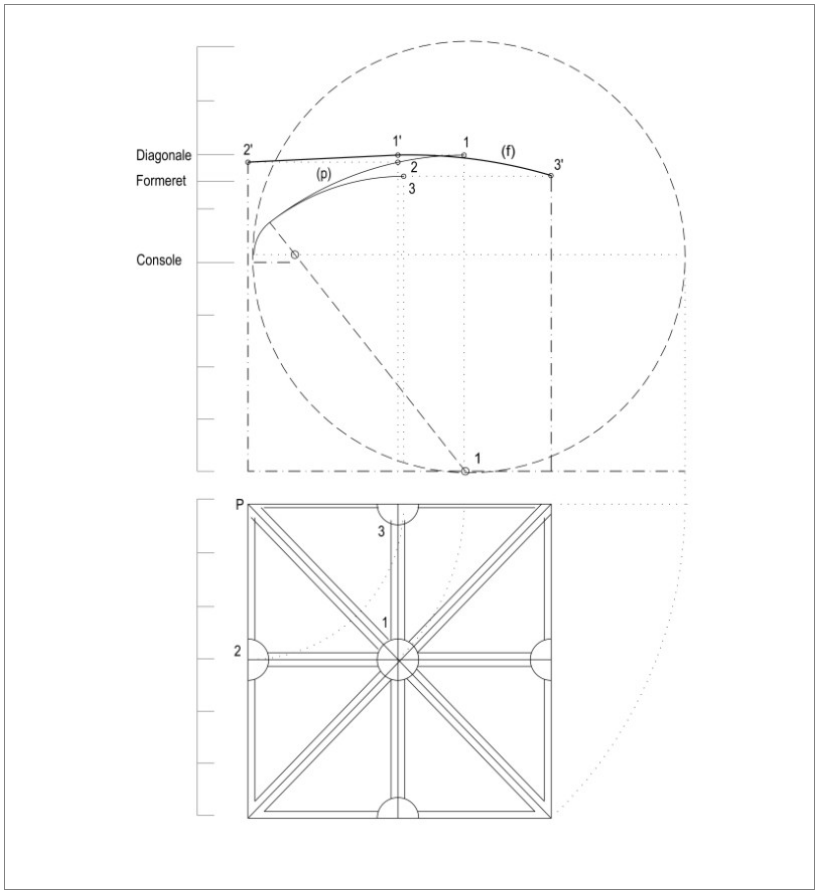


Figure 260. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du cellier du couvent du Christ, à Tomar.
La diagonale est une anse de panier centrée est au niveau du sol. La ligne faîtière est identique à l'arc qui circonscrit le plan du cellier (annexe A65).

plan et on pointe la clef 3. Pour tracer l'arc M3, on projette verticalement la clef 3 et on prend sa hauteur depuis la ligne faîtière ; on pointe la clef 3 au croisement des deux lignes ; on trace l'arc de rayon P1.

Hypothèse de construction

Une fois que le plan est tracé sur la plateforme de travail, on construit les tas de charge, dont tous les arcs sont de même rayon ; on place un étai de la hauteur de la clef 1, on place les cintres de la diagonale, la cerce de la ligne faîtière longitudinale et le cintre de M-2. On place la clef 3 et les cintres de l'arc M-3.

Une fois que tous les cintres sont placés, on pose d'abord les clefs et on pose les claveaux à partir des quatre points d'appuis simultanément, y compris le remplissage des reins.

4.16.4 *Cloître hospitalier*

Chaque couloir du cloître hospitalier est constitué de quatre travées rectangulaires, plus deux travées carrées aux angles, toutes de longueur variable (entre 5,00 m et 5,30 m). L'ensemble est délimité par les piliers-contreforts et des consoles opposées. Les dimensions des travées varient aussi en largeur (3,16 m au nord et 2,06 m à l'ouest) et en hauteur sous clefs (entre 7,37 m et 7,45 m, le sol étant incliné).

Les voûtes d'angle sont en croisée d'ogives et les autres sont composées de deux croisées de tiercerons sur chaque travée. Au centre, une forme en losange délimite un sommet plat. Ce jeu de nervures, associé à l'absence d'arcs transversaux, crée une unité visuelle entre les travées en forme de berceau surbaissé (Figure 236).

Les arcs formerets sont en anse de panier d'une hauteur mesurant



Figure 261. Voûte du cloître hospitalier du couvent du Christ, à Tomar.

environ ¼ de la portée. Le berceau est extrêmement surbaissé. Les profils des nervures sont de dimensions similaires. Nous avons vu au chapitre précédent que l'extrados des nervures est concordant avec la voûte, sans queue rentrante, la voûte étant en brique. Les nervures ne servent qu'à produire la forme.

Les clefs, positionnées verticalement, sont cylindriques, sans branches de raccordement avec les nervures.

Un seul arc en anse de panier suffit pour tracer et construire les deux nervures, le tierceron et le formeret. Au niveau du tas de charge, elles naissent à deux différents niveaux, plus haut le tierceron. Les liernes des losanges présentent une légère courbure, qui est celle du grand arc de l'anse de panier (annexe A67-68).

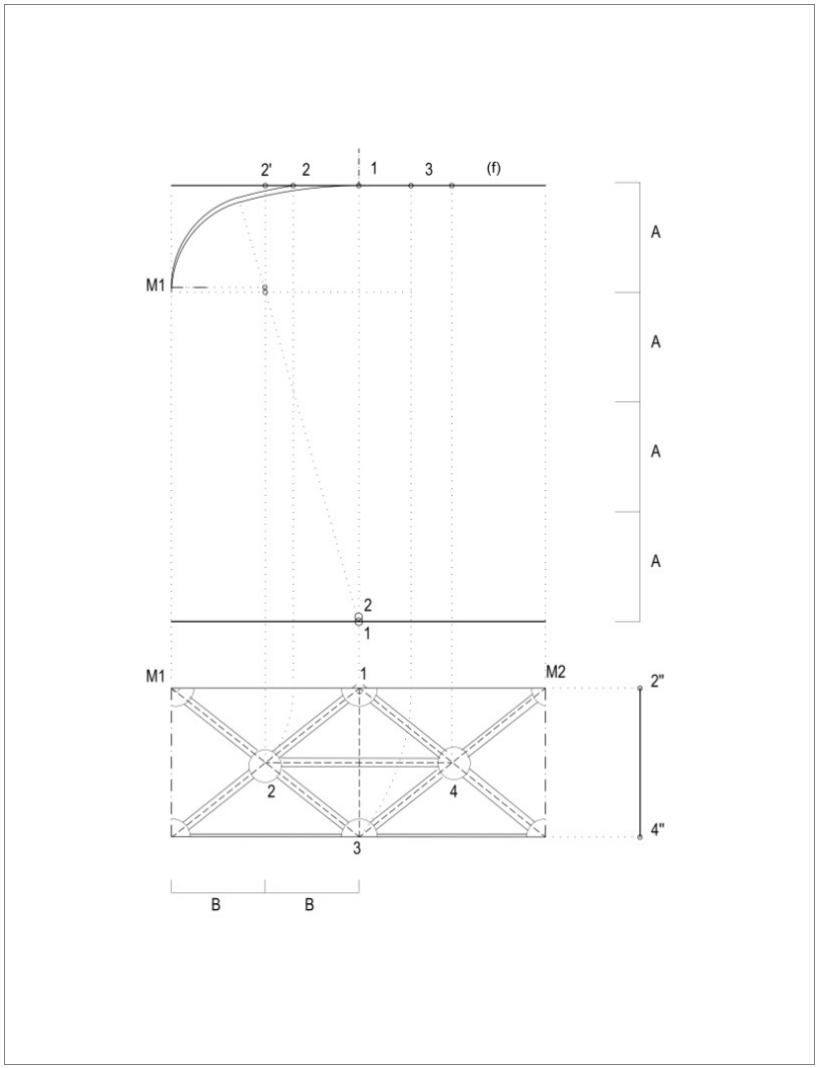
La Figure 262 reprend le tracé de la voûte en plan et en élévation. Voyons comment la voûte a pu être tracée, sachant que l'objectif était de créer une voûte en berceau surbaissé, avec un centre plat au sommet de sections horizontales.

Hypothèse de tracé en plan

- On divise la travée rectangulaire par son milieu (axe transversal) et on pointe les clefs des formerets (1 et 3) ;
- On trace deux paires de diagonales de chaque côté de l'axe. Les tiercerons se croisent au sommet de la voûte, où on pointe les clefs centrales 2 et 4. Ces clefs divisent les tiercerons M1-3 et M2-3 en deux segments.
- On trace la ligne faîtière longitudinale entre les deux clefs centrales.

Hypothèse de tracé en élévation

- Hauteurs : on détermine d'abord la hauteur de la voûte, à environ 6,00 m, distance correspondant à la longueur de la diagonale (si on prend les dimensions sur une travée de l'aile nord) ; la console se situe au quart de la hauteur de la voûte ;
- Formeret : on trace l'arc principal M1-1 en anse de panier dont le centre est au niveau du sol. Le centre du petit arc se situe au niveau du deuxième anneau de la console ; on pointe la clef du formeret (1).
- Ligne faîtière : la hauteur de la clef 1 détermine la hauteur des autres clefs 2, 3 et 4 du losange ; à partir de (2), on trace la ligne faîtière longitudinale horizontale.
- Tiercerons : après avoir défini les faîtières et les hauteurs des clefs, on trace le segment du tierceron M1-2 de même arc que M1-1. Pour atteindre le même niveau de la clef 2, l'arc est tracé plus haut. Nous pouvons aussi tracer cette voûte avec les deux arcs au même niveau, vu que la différence de hauteur entre les clefs est faible (0,07 m). Ce tracé a permis de simplifier la construction puisqu'il ne requiert l'élévation que d'un seul arc et, pour la taille du tas-de-charge, un seul arc naissant à un seul niveau.



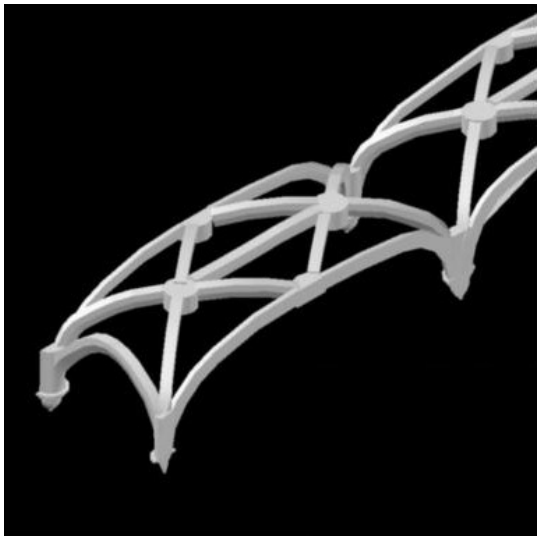


Figure 262. Hypothèse de tracé en plan et élévation.
Voûte du cloître hospitalier du couvent du Christ, à Tomar.
Un seul arc en anse de panier suffit pour tracer et construire toutes les nervures, les tiercerons, les formerets et les liernes. Au niveau du tas de charge, les nervures naissent à deux différents niveaux

Figure 263. Dessin tridimensionnel de la voûte du cloître hospitalier.

Hypothèse de construction

- Formeret : on pose d'abord les formerets, dont on dispose les clefs 1 et 4
- Lignes faîtières : avec un étai de même hauteur que la clef 1, on place les autres clefs 2 et 4 de la faîtière longitudinale de la voûte.
- Tiercerons : après avoir trouvé l'emplacement des clefs, on dispose les cintres pour construire les tiercerons.
- La structure en triangles est stable et on peut poser les pierres, d'abord les clefs et ensuite les claveaux qui partent des tas de charges.
- Après avoir posé les nervures, on construit les voûtains en briques, en montant vers le sommet de la voûte, simultanément à partir des reins des quatre points d'appui afin d'assurer l'équilibre de la structure. Comme pour les voûtes en pierres, les nervures servent à déterminer préalablement la forme et elles aident la construction, laquelle a dû être faite par travée. Nous avons observé sur la voûte du chapitre en ruines que les briques –massives- ont été disposées en position verticale perpendiculairement aux murs.

4.16.5 *Bibliothèque*

La bibliothèque du couvent de Christ à Tomar est voûtée par un réseau constitué de quatre croisées d'ogives et de liernes. Son plan rectangulaire de 21,84 m sur 7,40 m est divisé par des consoles en quatre travées dont la division est visuellement quasi inexistante. L'ensemble de la voûte a une forme en berceau, que souligne encore la continuité de la voûte. La ligne faîtière et les liernes parallèles aux murs favorisent une lecture longitudinale du berceau. Les liernes diagonaux qui relient les travées confèrent également à la voûte une continuité dans le sens diagonal (Figure 264).



Figure 264. Voûte de la bibliothèque du couvent du Christ, à Tomar.

Les nervures s'appuient sur des consoles tandis que la voûte est supportée par deux murs d'une épaisseur de 1,30 m munis de contreforts de 1,20m.

L'analyse géométrique de nos relevés (annexe A69-70) montre qu'il existe un rapport entre le plan et l'élévation dans le tracé de tous les arcs. La nervure transversale en plein cintre, l'arc principal (p), son diamètre est égal à la largeur de la voûte. Le rayon de la ligne faîtière transversale (f) est égal à la longueur d'une travée. Les ogives en anse de panier sont formées par l'arc transversal (p) et, vers le sommet (entre les deux clefs intermédiaires), son grand arc de cercle est centré au niveau du sol et son rayon est égal à la largeur du plan. Un arc de rayon égal à la diagonale de la travée sert à tracer les liernes en diagonale.

Toutes les nervures sont verticales et présentent un même profil. Les clefs aux décors Renaissance sont cylindriques et dépourvues de branches. Elles sont disposées verticalement, à l'exception des clefs intermédiaires, qui sont perpendiculaires à la voûte.

Hypothèse de tracé en plan

- Travée : on trace un plan rectangulaire de proportion 3:4.
- Ogives : sur le plan rectangulaire, on trace les diagonales pour trouver la clef centrale (1).
- Lignes faîtières : on trace l'axe transversal (2-3), et l'axe longitudinal de la voûte (4-5) en suivant la ligne faîtière.
- Liernes : on trace des liernes croisant les diagonales entre les clefs 2, 4, 3 et 5. Ils forment un losange central qui occupe toute la longueur et la largeur de la voûte. Au croisement des liernes avec les diagonales, on pointe les clefs 6, 7, 8 et 9 qu'on relie par des liernes longitudinaux 6-7 et 8-9. Les liernes divisent les ogives en 2 segments et délimitent la surface continue en berceau de la voûte. Les liernes sont également constitués de deux segments.

Hypothèse de tracé en élévation

- Ligne faîtière longitudinale (f) : la hauteur de la voûte est égale à la largeur du plan (M1-M2) ; on trace la ligne faîtière horizontale et on pointe la clef centrale 1'. La console est à mi-hauteur.
- Arc transversal M1-M2 (p) : on trace l'arc principal en demi-cercle à partir de la clef centrale 1'. On pointe la clef (4) sur cet arc.
- Lignes faîtière : à partir de 1', on trace la ligne faîtière longitudinale horizontale. On trace la ligne faîtière transversale courbe (1'-2') dont le rayon est égal à la largeur de la travée.
- Ogives : nous l'avons indiqué, l'ogive a une forme d'arc à trois centres. Les deux arcs inférieurs sont égaux à (p) et l'arc du sommet est centré au niveau du sol. On peut tracer ainsi cet arc mais, en cours de construction, le plus simple est de ne tracer que la nervure inférieure M-6, et on reprend alors l'arc (f) entre 1-6. La forme est quasiment la même. Il suffit de tirer la hauteur de (6) sur (f), et de la projeter verticalement pour trouver son centre.

- Formeret : on reporte la distance M-2 en élévation et on projette verticalement la clef 2 jusqu'à la hauteur tirée de (f) ; à partir de (2) on trouve le centre de l'arc et on trace l'arc supérieur du formeret avec le rayon de l'arc (p) ; l'arc de cercle inférieur est tangent au mur.

L'arc de la ligne faîtière transversale est l'arc qui produit la forme en berceau qui détermine la hauteur des clefs.

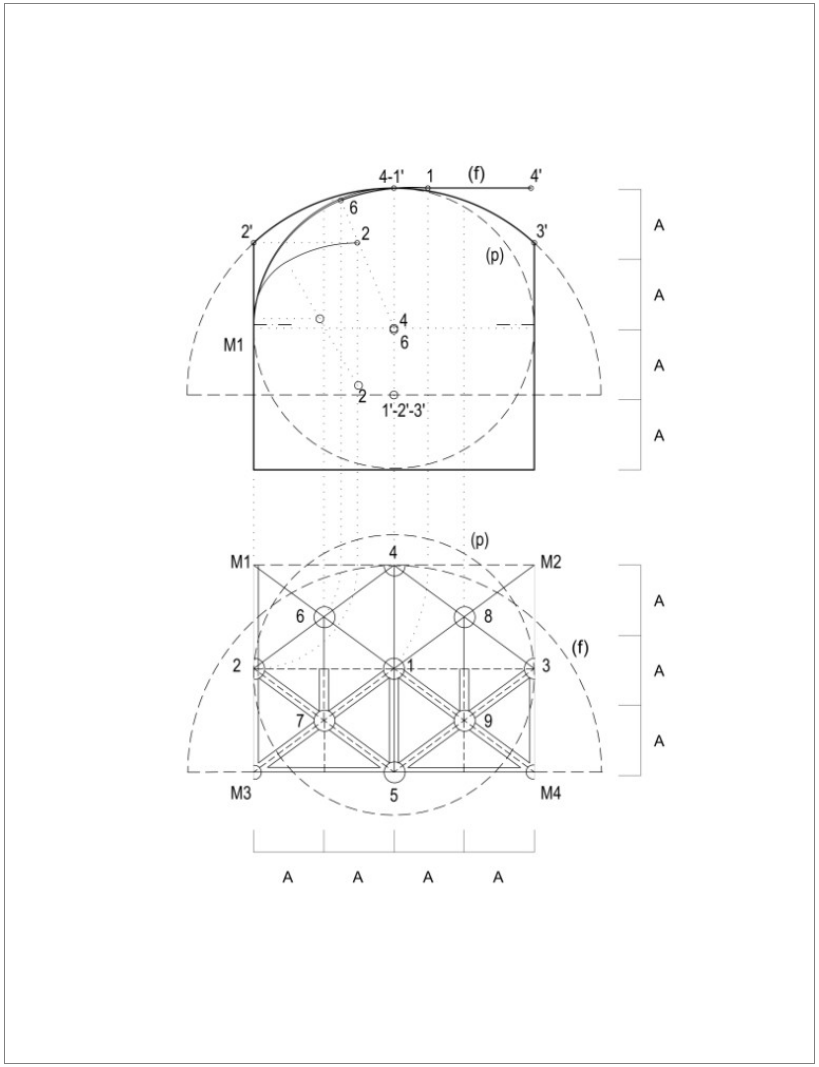
La diagonale n'est pas en anse de panier, bien que sa forme s'en rapproche ; elle est formée sur deux arcs séparés par la clef 6 - l'arc principal et l'arc de la ligne faîtière – ce qui simplifie le tracé et la construction.

Hypothèse de construction

- Après avoir établi les tas de charge et la plateforme de travail et reproduit le plan sur celle-ci, on pose les cintres.
- Arcs transversaux : on place d'abord le cintre des arcs M1-M2 et M3-M4. À partir du plan au sol, on trouve l'emplacement des clefs 4 et 5 au fil à plomb.
- Faîtière longitudinale : on place un étai en (1), de même hauteur que les clefs 4 et 5, avec une cerce entre celles-ci.
- Faîtière transversale : on place une cerce transversale en (1), de rayon égal à la longueur en plan, jusqu'aux murs (clefs 2 et 3).
- Ogives : reportant la hauteur des clefs intermédiaires 6, 7, 8 et 9 sur la faîtière transversale, on place les étais des clefs à leurs emplacements au sol. On dispose les cintres jusqu'aux clefs, dont la courbe est celle de l'arc transversal (p). On place les cerces pour les liernes entre leurs clefs et la clef centrale (1). Entre les clefs intermédiaires des ogives, on place les cerces des liernes longitudinaux 6-7 et 8-9.

La construction de la travée peut commencer. On place les clefs et on pose les claveaux des nervures, les briques et le remplissage à partir des consoles jusqu'au losange central. Une fois que toute la voûte est construite jusqu'au losange, on construit celui-ci en posant les briques depuis les murs jusqu'à la clef centrale.

Pour la construction de la voûte, il a suffi de connaître les courbes de (p) et de (f) pour construire les cintres et trouver l'emplacement des clefs à leurs hauteurs.



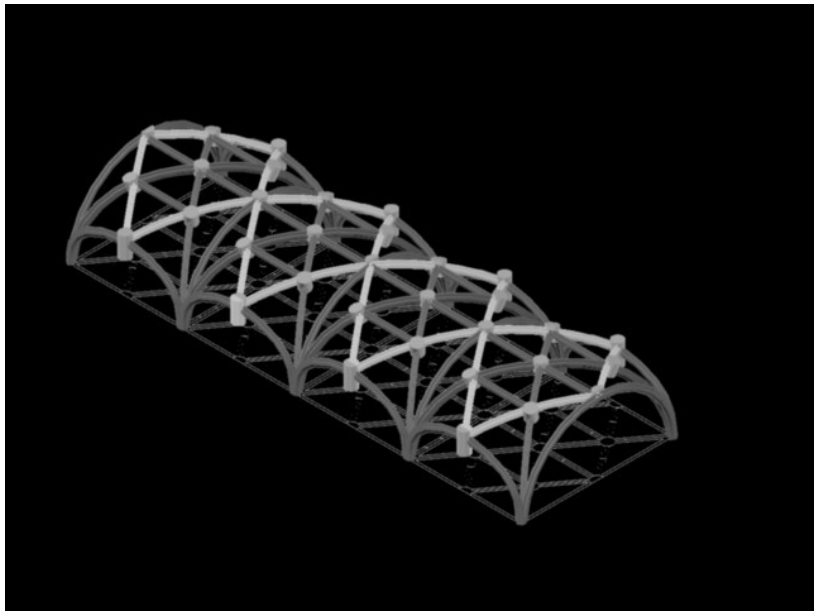


Figure 265. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la bibliothèque du couvent du Christ, à Tomar.
La nervure transversale en plein cintre est l'arc principal (p). Le rayon de la ligne faîtière transversale (f) est égal à la longueur de la travée. La bibliothèque a une hauteur identique à sa largeur La diagonale n'est pas en anse de panier, bien que sa forme s'en rapproche ; elle est formée sur deux arcs séparés par la clef 6 - l'arc principal et l'arc de la ligne faîtière.

Figure 266. Dessin tridimensionnel de la voûte de la bibliothèque du couvent du Christ, à Tomar.
Les liernes composés se prolongent entre les travées.

4.16.6 *Antichambre de la salle du chapitre*

L'antichambre de la salle du chapitre du couvent du Christ à Tomar a un plan rectangulaire de 10,16 m x 8,50 m et elle est recouverte par une voûte à nervures composées sur quatre croisées d'ogives. Sa hauteur de 6,80 m correspond à un peu moins de la moitié des 13,30 m de la diagonale en plan.

La voûte est délimitée et supportée par les consoles, en coin et intermédiaires sur chaque mur. Depuis les consoles naissent des arcs transversaux et longitudinaux qui divisent la voûte en quatre modules. En regardant le plan, l'ensemble ressemble à quatre travées composées de paires de diagonales. À l'instar de la voûte du cloître hospitalier, les ogives sont composées de plusieurs segments d'arc. Au sommet de la voûte, des liernes de hauteur identique forment un rectangle qui relie les clefs centrales de chaque croisée. Ce rectangle délimite une surface surbaissée de la voûte jusqu'à la clef centrale (Figure 267).

Nos relevés indiquent que toutes les ogives sont en anse de panier utilisant les mêmes arcs : un petit arc au niveau de la console et un grand arc principal (p), la circonférence circonscrite en plan. Le grand arc est également utilisé pour les liernes.

Nous observons que la construction de la voûte n'est pas très rigoureuse, les consoles ont des hauteurs différentes et les formerets n'ont pas la même forme.

Nous remarquons que la grande diagonale a pu être conçue à partir d'un cercle de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan. Mais elle est constituée de segments de (p) (voir annexe A71-72.

Toutes les nervures ont un profil identique. Les clefs sont cylindriques, sans branches et portent un décor Renaissance. Elles sont verticales, sauf les clefs intermédiaires des faîtières (transversale et longitudinale).

Nous présentons sur la Figure 268 le tracé de la voûte en plan et en



Figure 267. Voûte de l'antichambre de la salle du chapitre du couvent du Christ, à Tomar.

élévation. La légende se rapporte à un des modules, ¼ de la voûte.

Hypothèse de tracé en plan

- Faîtières : à partir du plan rectangulaire, on trace les deux axes les lignes faîtières (transversale et longitudinale) qui divisent la voûte en quatre modules ; on place les consoles aux angles des murs (M2) et celles des axes (M1 et M3).
- Ogives : on trace les diagonales en plan pour trouver la clef centrale (1) ; on trace ensuite les diagonales de chaque module et chaque clef centrale (4).
- Liernes : on divise la voûte parallèlement aux axes des clefs centrales des quatre modules (4) ; on obtient des liernes, la forme rectangulaire au sommet de la voûte. Ces lignes constituent les faîtières (longitudinale et transversale) des quatre croisées.

Le plan est tracé comme s'il s'agissait de quatre travées en croisée d'ogives.

Hypothèse de tracé en élévation

- Ligne faîtière / Nervure transversale : on trace l'arc M1-1 en anse de panier et on trouve l'emplacement les clefs 1 et 2. Le rayon du grand arc est égal à la moitié de la diagonale en plan. Cet arc est l'arc principal (p) qui sert à tracer toutes les nervures.
- Ogive : à partir de (p) on prend la hauteur de (4), qui est égal à (2). On projette verticalement la clef 4 et on trace le segment d'ogive M2-4 avec le même arc (p). Le centre du grand arc est au niveau du sol et celui du petit arc est au niveau de la console, qui est à 1/3 de la hauteur du rayon de (p). Le sommet (entre 1 et 4) ne doit pas être tracé, il est construit avec un segment de (p).

Formerets : on projette verticalement les clefs 5 et 6 des formerets sur le segment d'ogive et on obtient les hauteurs de formerets. Ces arcs sont coïncidents.

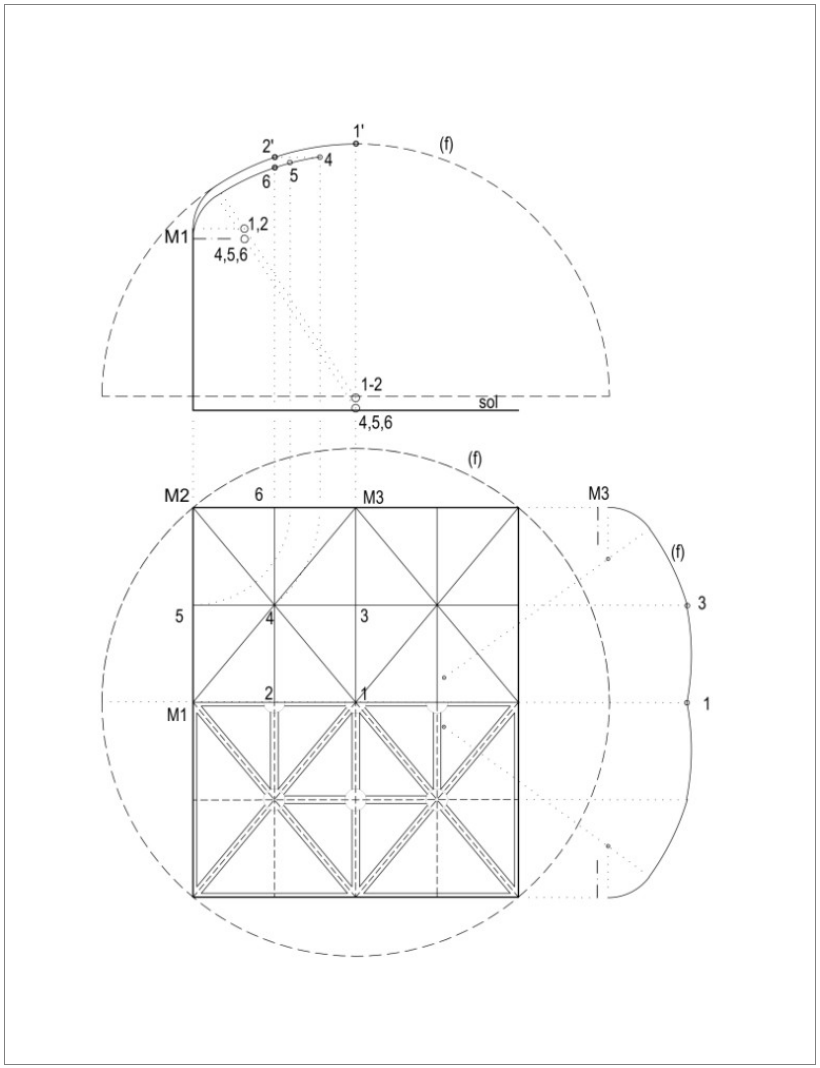
- Longitudinalement : à partir de (p) on prend la hauteur de (3), qui est égal à (1). Avec le même arc (p) on trace le segment M3-3 de l'arc longitudinal. Le sommet (entre 1 et 3) ne doit pas être tracé, il est construit avec un segment de (p).

Toutes les nervures sont composées des mêmes deux arcs qui forment l'anse de panier de la transversale ; le petit arc de la console et le grand arc s'abaissent pour atteindre leur hauteur de clef. Cela signifie qu'il ne faut plus qu'une seule élévation d'arc, celle de la transversale. Un seul tracé a ainsi pu suffire pour construire toutes les nervures.

Hypothèse de construction

Toutes les consoles sont construites, ainsi que les tas de charge, jusqu'au dernier sommier horizontal, avec le petit arc de (p).

Une fois que la plateforme de travail est en place et que le plan est reproduit sur le plancher, on pose les cintres et on construit les arcs,



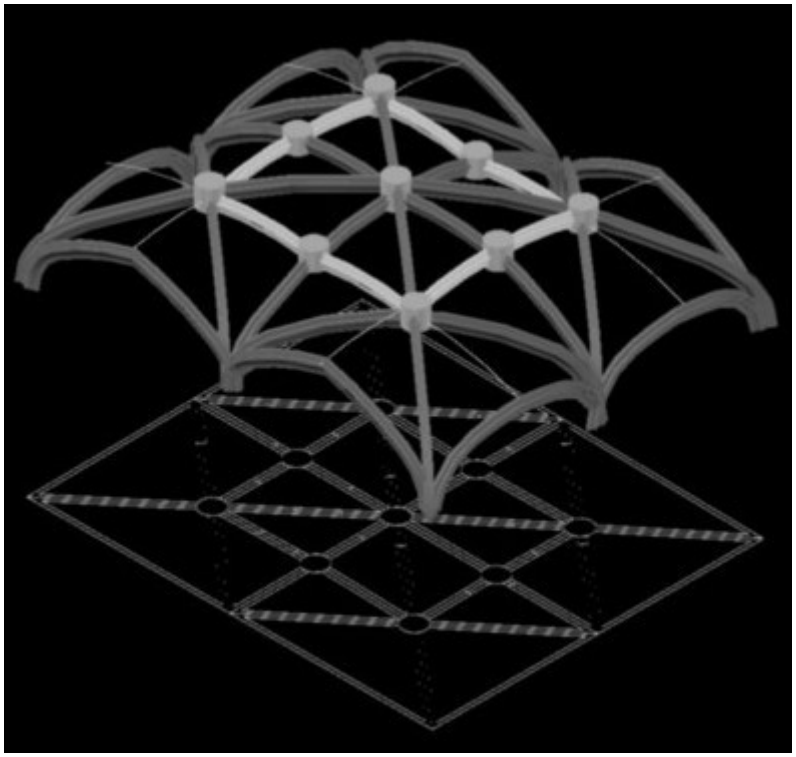


Figure 268. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de l'antichambre de la salle du chapitre du couvent du Christ, à Tomar.
L'arc principal (p) est celui que circonscrit le plan. Il sert à construire toutes les nervures. La ligne faîtière (f) est tracé avec un rayon le double du précédent. Les ogives composées, principales et secondaires, sont construites avec ces deux arcs (p) et (f).

Figure 269. Dessin tridimensionnel de la voûte.
Les lignes faîtières secondaires (le rectangle) relient les quatre croisées d'ogives et délimitent une surface surbaissée.

lesquels ont la même courbure que l'arc principal (p).

Nervure transversale : on place d'abord le cintre de l'arc transversal, celui qui produit la forme. À partir du plan sur le plancher, on trouve l'emplacement des clefs à l'aide d'un fil à plomb (1 et 2).

- Nervure longitudinale : on place en (3) un étai donnant la hauteur de la clef 1, on pose les cintres du segment M3-3 et celui du segment (3-1) en respectant les hauteurs de clefs.
- Ogives : avec un étai donnant la hauteur de la clef 2, on place la clef 4. À partir des tas de charge, on pose les cintres des arcs (M1-M3) et (M2-4). On relie ensuite les clefs 4-1.
- Formerets : les formerets ont la même courbure que (p) et sont à la même hauteur que M2-4. Sur place, on observe que la construction de ces arcs n'est pas très rigoureuse.
- Rectangle central : on relie les clefs du rectangle avec des cintres de même courbure que (p) et on obtient une structure stable reliée par des cintres.
- Pose des pierres : on pose d'abord les clefs verticales, celles des centres des arcs diagonaux (1 et 4). On pose les claveaux des nervures, on fermer les voûtains en briques et on remplit les reins simultanément à partir les différentes consoles jusqu'au rectangle central.
- On continue à poser les claveaux des arcs faîtiers jusqu'à la clef centrale (1). On remarque que les clefs intermédiaires (2 et 3) sont inclinées et perpendiculaires aux nervures pour la suite des opérations (construction en même temps que les arcs). On construit les segments des arcs diagonaux (1-4). La pose des claveaux est terminée. Il ne reste plus qu'à maçonner les briques du rectangle central surbaissé.

4.16.7 *Réfectoire*

Ce type de voûtes ne constitue pas le sujet de notre thèse, mais nous la présentons pour sa forme en berceau.

Le réfectoire mesure 33,00 m sur 9,00 m. Il est recouvert d'une voûte à caisson en forme de berceau culminant à 7,14 m, soit un rapport de 4:5 avec sa largeur. Le bandeau longitudinal est à la moitié de la hauteur de la voûte.

L'arc qui produit la forme est un arc en anse de panier, presque imperceptible sur place. Le centre du grand arc est à 1:3 de la hauteur de la voûte et le centre du petit arc est surélevé de 0,17m du bandeau. (Figure 270)

On remarque quelques détails constructifs : les nervures présentent un profil vertical, non perpendiculaire à la voûte, ce qui est un trait gothique. Au croisement des nervures longitudinales et transversales, on trouve un claveau commun, plus petit et à quatre branches, qui est comme une clef de voûte. Au premier croisement inférieur, le claveau est plus long. À la naissance des arcs, le premier claveau possède deux branches qui font partie du bandeau. Nous retrouvons un détail identique au niveau des claveaux des nervures longitudinales, qui ont deux branches appartenant aux formerets.

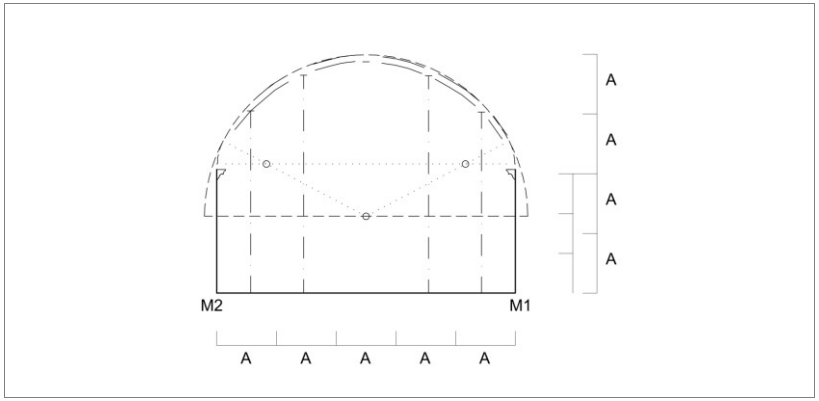


Figure 270. Hypothèse de tracé en élévation de la voûte du réfectoire du couvent du Christ, à Tomar.



Figure 271. Voûte du réfectoire du couvent du Christ, à Tomar.

4.17 Monastère de Jerónimos à Lisbonne

4.17.1 *Cloître supérieur*

Le premier étage du cloître du monastère de Jerónimos est composé de travées sur plan rectangulaire (6,78m x 6,15m), limitées par des piliers/contreforts et des consoles placées le long des murs. La voûte est composée de croisées d'ogives, et des tiercerons en forme d'étoiles. Sa section transversale est courbe et sa section longitudinale est horizontale. L'unité des travées est réalisée par la ligne faîtière longitudinale, qui souligne la continuité de la voûte, à la manière des voûtes anglaises, sa caractéristique la plus marquante (Figure 272.).

Les nervures sont de dimensions similaires entre elles et présentent des différences de section très légères (épaisseur moyenne de 0,29m), presque imperceptibles, ce qui renforce la continuité spatiale entre les travées. Au niveau du tas de charge, on observe que les nervures naissent à plusieurs niveaux.

Les clefs sont placées sur les deux lignes faîtières. Posées verticalement, leur forme est cylindrique, sans branches de liaison avec les nervures.

Nos relevés indiquent qu'il existe un rapport proportionnel entre le plan et l'élévation. Un arc de cercle de diamètre égal à la diagonale en plan a servi pour réaliser toutes les nervures, y compris les liernes. La ligne faîtière transversale est un arc de cercle de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan. La longueur de la travée est égale aux ¾ de la diagonale. La console est située à une hauteur égale au 1/3 de la hauteur du formeret.

Hypothèse de tracé en plan

- On trace un rectangle dont la longueur et égale aux ¾ de la diagonale. Au croisement des diagonales, on marque la clef



Figure 272. Voûte du premier étage du cloître du monastère de Jerónimos à Lisbonne.

centrale 1.

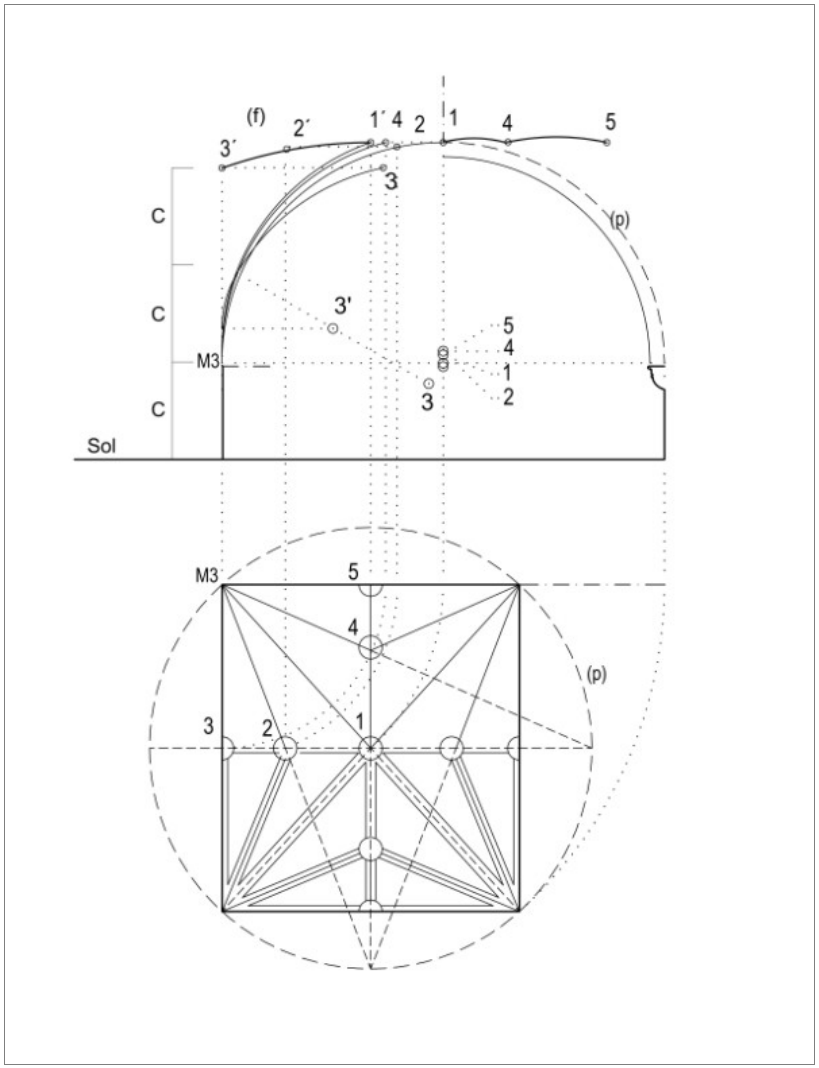
- On trace les deux axes, longitudinal et transversal, et on marque les clefs 3 et 5.
- On trace les tiercerons sur les bissectrices des nervures précédentes. Au croisement des tiercerons et des axes, on marque les clefs secondaires (2) et (4).

Hypothèse de tracé en élévation

- Ogive : on trace l'ogive (p) en demi-cercle prenant sa longueur M-1 en plan ; à la verticale du centre, on pointe la clef centrale (1).
- Ligne faîtière : à partir de (1), on trace la ligne faîtière transversale en arc de cercle, de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan ; on marque les clefs transversales (2) et (3) ; la faîtière longitudinale est horizontale.
- Tiercerons et doubleaux : on prend leur longueur en plan, on projette verticalement leur clef de manière à atteindre (f). Avec la même ouverture de compas que (p), on trace l'arc de cercle correspondant à chaque nervure. Les centres de M-4 et M-5 sont plus élevés, puisque ces nervures sont plus courtes que M-1 et qu'elles doivent atteindre la même hauteur de clef. Ainsi, M-2 est-elle un peu plus basse que M-1. Toutes les nervures sont des arcs identiques qui s'élèvent ou s'abaissent en fonction de la hauteur de clef à atteindre.
- Le formeret M-3 est un arc différent, à deux centres. On reprend sa longueur en plan, qu'on projette verticalement et on trace l'arc de même rayon que (p) dont le centre est rabaissé. Au niveau du tas de charge, on dessine un deuxième arc tangent au mur, et donc plus court.

Hypothèse de construction

- Une fois tracé le plan et l'élévation des arcs, on utilise les patrons pour tailler et construire les tas de charges ; les nervures sont toutes taillées selon la courbure de l'arc (p). Sur la plate-forme de travail, on reproduit le plan.
- Diagonale : On dispose le cintre de la diagonale dont on trouve l'emplacement de la clef (1) au fil à plomb.
- Ligne faîtière longitudinale : à partir de la hauteur de la clef (1), on place les cintres de la ligne faîtière, horizontale et les étais des clefs (4) et (5) de même hauteur que (1), en suivant le plan tracé sur la plate-forme.
- Faîtière transversale : à partir de la clef (1), on dispose le cintre de la ligne faîtière transversale jusqu'aux murs (clef 3) ; au fil à plomb, on trouve l'emplacement de la clef (2), dont on place l'étai.
- Doubleaux et tiercerons : une fois trouvé l'emplacement des clefs, on dispose les cintres jusqu'aux clefs (2) et (4) ; il suffit ensuite de placer les cintres de courbe (p) entre le tas de charge et l'étai de chaque nervure.



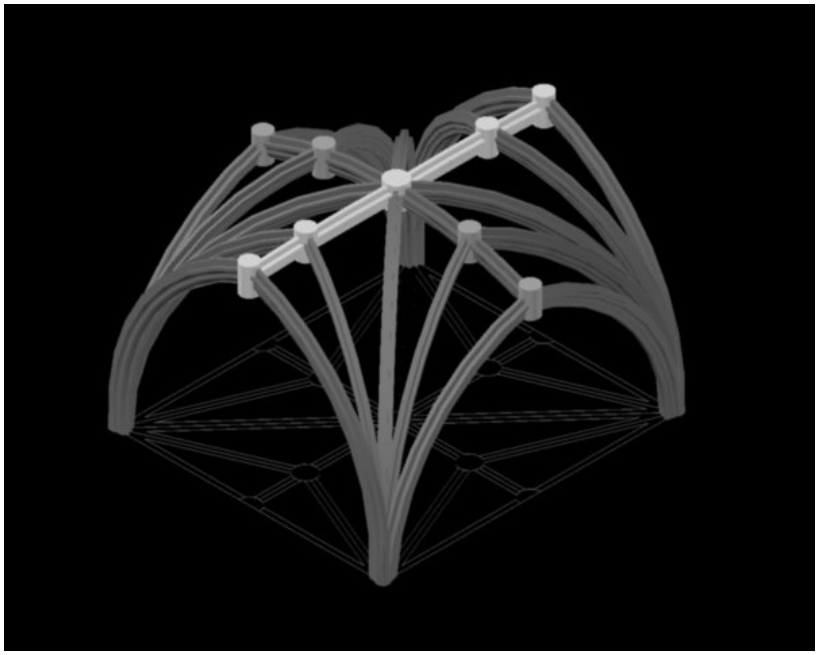


Figure 273. Hypothèse de tracé en plan et en élévation.
L'arc principal (p) circonscrit au plan est utilisé pour la construction de toutes les nervures, excepté le formeret. La ligne faîtière transversale (f) est en arc de cercle de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan, soit le double de celui de (p). La hauteur des clefs et le positionnement des nervures est déterminé par la forme des lignes faîtières.

Figure 274. Dessin tridimensionnel.
L'unité des travées est réalisée par la ligne faîtière longitudinale, qui souligne la continuité horizontale de la voûte.

- On commence par la pose des clefs, et ensuite la construction des nervures, des voûtains et le remplissage démarre à partir des reins des quatre points d'appui, simultanément afin d'assurer l'équilibre de la structure, jusqu'au sommet de la voûte. Les voussoirs sont placés entre chaque paire de nervures, dont les directions nous pouvons constater dans la Figure 275.

Pour construire la voûte il suffit de connaître la hauteur d'une clef (clef centrale ou de formeret) et deux courbes : celles de l'arc principal (p) et de la ligne faîtière (f).

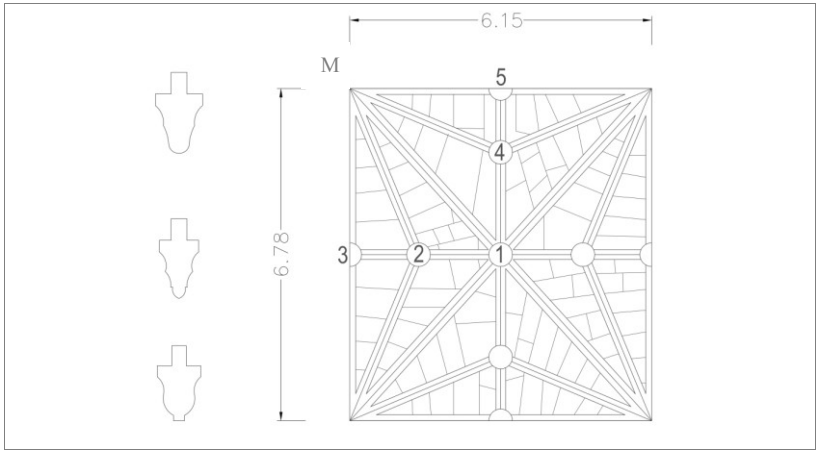


Figure 275. Plan des voussoirs et profils des nervures.
Voûte du premier étage du cloître du monastère de Jerónimos à Lisbonne.
Les nervures présentent des différences de section et de dimensions très légères. De haut en bas : diagonales (0,30m); tiercerons, liernes (0,29m); formerets (0,28m).

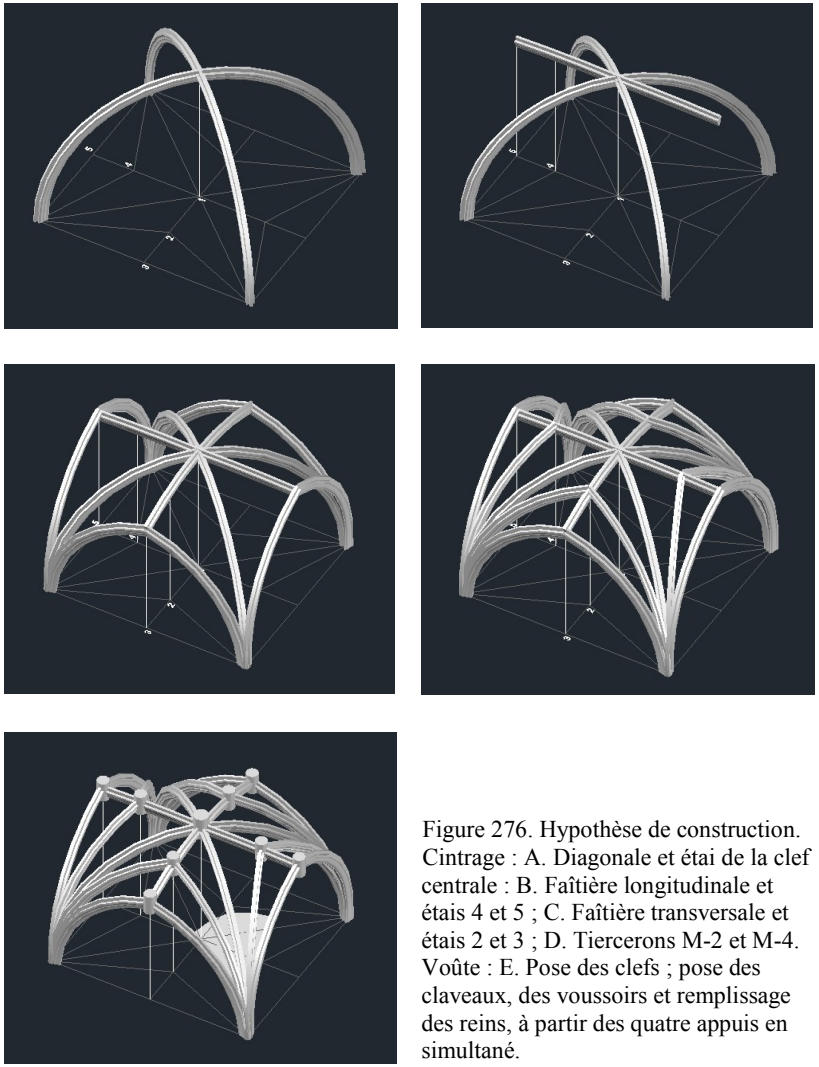


Figure 276. Hypothèse de construction.
Cintrage : A. Diagonale et étai de la clef centrale : B. Faîtière longitudinale et étais 4 et 5 ; C. Faîtière transversale et étais 2 et 3 ; D. Tiercerons M-2 et M-4.
Voûte : E. Pose des clefs ; pose des claveaux, des voussoirs et remplissage des reins, à partir des quatre appuis en simultané.

4.17.2 *Chapelles du transept nord et sud*

Il est intéressant de comparer les deux chapelles du transept de l'église de Jerónimos car leur observation permet de comprendre l'importance du tracé des nervures en élévation. En effet, si leurs deux voûtes sont similaires en plan, elles diffèrent quant à leur élévation et à leur forme.



Figure 277. Voûte de la chapelle nord du transept du monastère de Jerónimos.

Les deux chapelles sont tracées sur un même plan carré de 9,00m pour une même hauteur de 17,00 m. Elles sont recouvertes de voûtes à liernes en forme d'octogone, structurées par des croisées d'ogives et des tiercerons en forme d'étoile à quatre branches.

Voyons en quoi leurs formes diffèrent. La voûte nord est beaucoup plus régulière et continue, au sommet l'octogone est visible plus clairement, à la manière d'une coupole. La voûte sud présente une



Figure 278. Voûte de la chapelle sud du transept du monastère de Jerónimos.

surface brisée. Elle ressemble une voûte à tiercerons et les liernes de l'octogone ne changent pas sa forme. (Figure 278).

Le relevé confirme ces observations. Au sud, les clefs intermédiaires des diagonales sont trop basses par rapport aux autres clefs de l'octogone (différence de 0,50m), alors qu'au nord, l'octogone central est presque à niveau (la hauteur des clefs diffèrent au maximum de 0,10m).

Pour les deux cas, les lignes faîtières transversales et longitudinales sont déterminées par un arc de cercle dont le rayon est égal à la longueur de la diagonale en plan, qui donne la hauteur de la clef centrale et celle des formerets. Au sud, la hauteur des clefs secondaires est déterminée par ces lignes. Dans la voûte nord, ces clefs s'abaissent pour atteindre la même hauteur que les autres clefs de l'octogone, qui est alors horizontal.

L'arc principal (p) est l'arc de cercle de diamètre égal à la diagonale en plan, utilisé pour la construction des nervures, liernes compris (principe de standardisation). Dans la voûte sud, les nervures sont des arcs de cercle qui naissent au même niveau, près des consoles. Dans la voûte nord, les nervures sont des arcs en anse de panier, dont (p) est le plus grand arc, et leurs naissance est beaucoup plus élevée (1,34m plus haut que la console).

Ces différences d'élévation et de forme des voûtes résultent de deux conceptions et constructions différentes. L'objectif est : au sud, donner une forme courbe à la ligne faîtière ; au nord, de créer une surface continue, en forme de coupole dans l'octogone central, il existe un rapport plus proche entre le plan et l'élévation, caractéristique de João de Castilho.

Nous n'avons aucune information concernant l'attribution de ces deux voûtes. Nous savons cependant que le tracé de l'élévation des arcs est réalisé sur place, au moment du chantier. Or, les sources historiques nous apprennent que c'est Castilho qui a construit la plus grande part du monastère. Même en supposant que Boitaca eût laissé les plans (ce que nous ne croyons pas) c'est à Castilho qu'on doit attribuer l'élévation de la voûte. Ce contrôle de la forme et du rapport entre le plan et l'élévation qu'on trouve dans la voûte nord, est la principale caractéristique de João de Castilho.

Nous présentons aux Figure 280 (chapelle nord) et Figure 2814 (chapelle sud), les tracés en plan et en élévation des deux voûtes.

Hypothèse de tracé en plan

- On trace les diagonales et les deux axes, longitudinal et transversal. On marque la clef centrale (1) et les clefs des formerets (3 et 5).
- On trace les tiercerons sur les bissectrices formées par les arcs précédents. À l'intersection avec les axes, on marque les clefs 2 et 3.
- Une circonférence de centre à la clef 1 et de rayon 1-2, donne les autres clefs de l'octogone, intermédiaires aux diagonales.

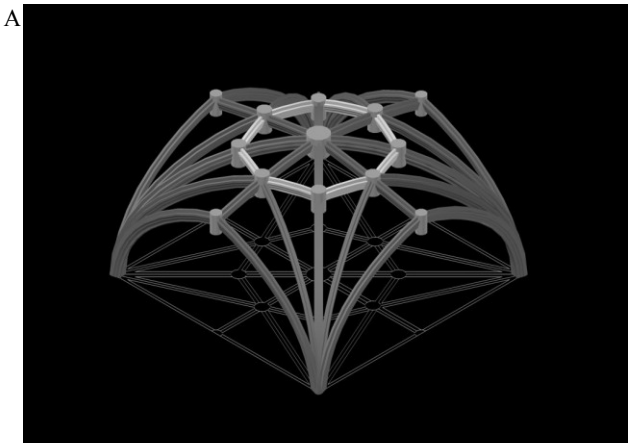
*Hypothèse de tracé en élévation de la voûte sud (*Figure 281*)*

- Diagonale: on trace un arc en demi-cercle de rayon égal à (p). Reprenant les distances tirées du plan on projette verticalement les clefs (1) et (6) sur l'élévation.
- Lignes faîtières (f) : On trace un arc de cercle de diamètre égal à la longueur de la diagonale en plan passant par la clef (1). Reprenant les distances en plan des clefs (2 et 3) on les marque sur (f).
- Tiercerons : on place la longueur (M-2 et M-4) en élévation et on projette verticalement les clefs jusqu'à la hauteur tirée de (f). On trouve le centre des tiercerons, un peu plus bas que celui de (1) et on trace l'arc de cercle M-2 et M-4 de même rayon que (p).
- Formerets : on projette verticalement les clefs (3 et 5) reprenant leur longueur en plan, jusqu'à la hauteur de (3'). Avec la même ouverture de compas (p), on trace l'arc M-3 et M-5 de centre un peu plus bas.
- Diagonale : on trace un arc en anse de panier, dont l'arc principal est égal à (p); sur cet arc on marque la clef centrale (1) et la clef intermédiaire (6).

Hypothèse de tracé en élévation de la voûte nord

- Lignes faîtières : À partir de (1), on trace la ligne faîtière ronde identique à celui de la voûte sud, qui donne la clef du formeret (3').

A



B

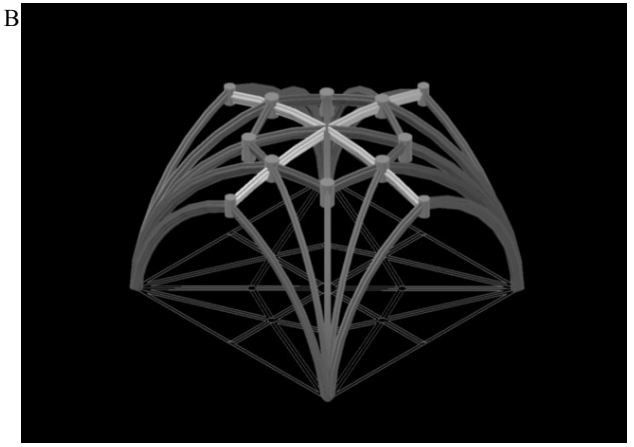


Figure 279. Dessin tridimensionnel des voûtes des chapelles nord (A) et sud (B) du transept.
Dans la voûte nord l'octogone est horizontal et régulier, il délimite une coupole. Dans la voûte sud l'octogone et la forme de la voûte sont brisés.

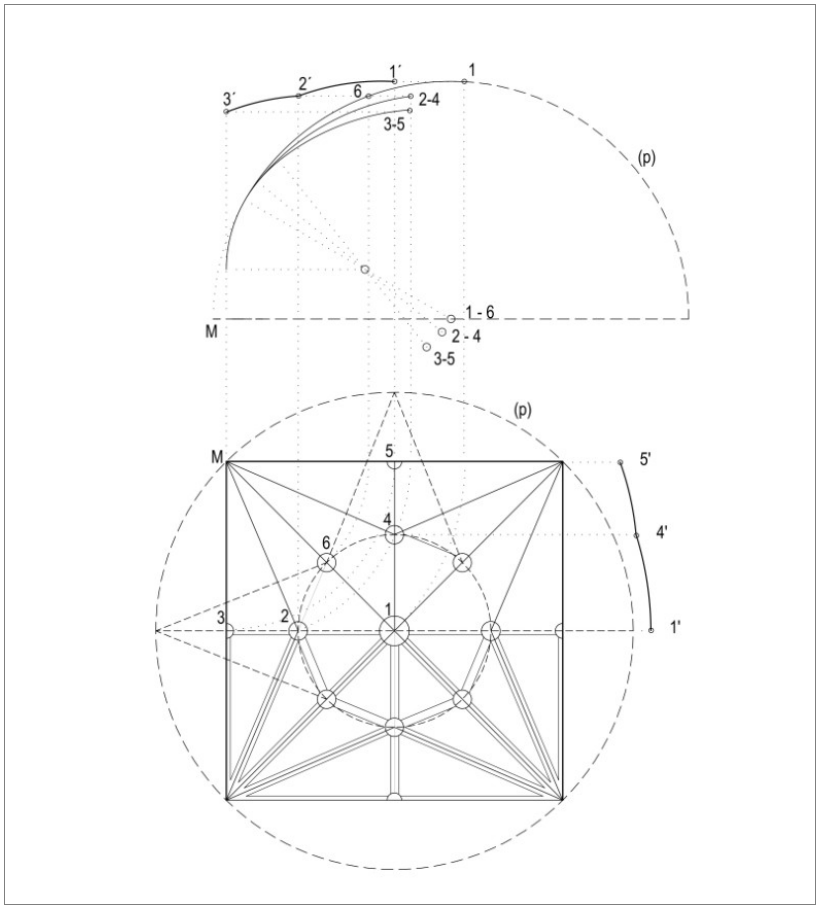


Figure 280. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle nord du transept du monastère de Jerónimos à Lisbonne.
Les nervures sont en anse de panier, le plus grand arc est identique à (p).
Méthode de construction anglaise, où (p) pivote autour du centre du petit arc pour atteindre la hauteur des clefs, déterminée ici par l'octogone horizontal central.

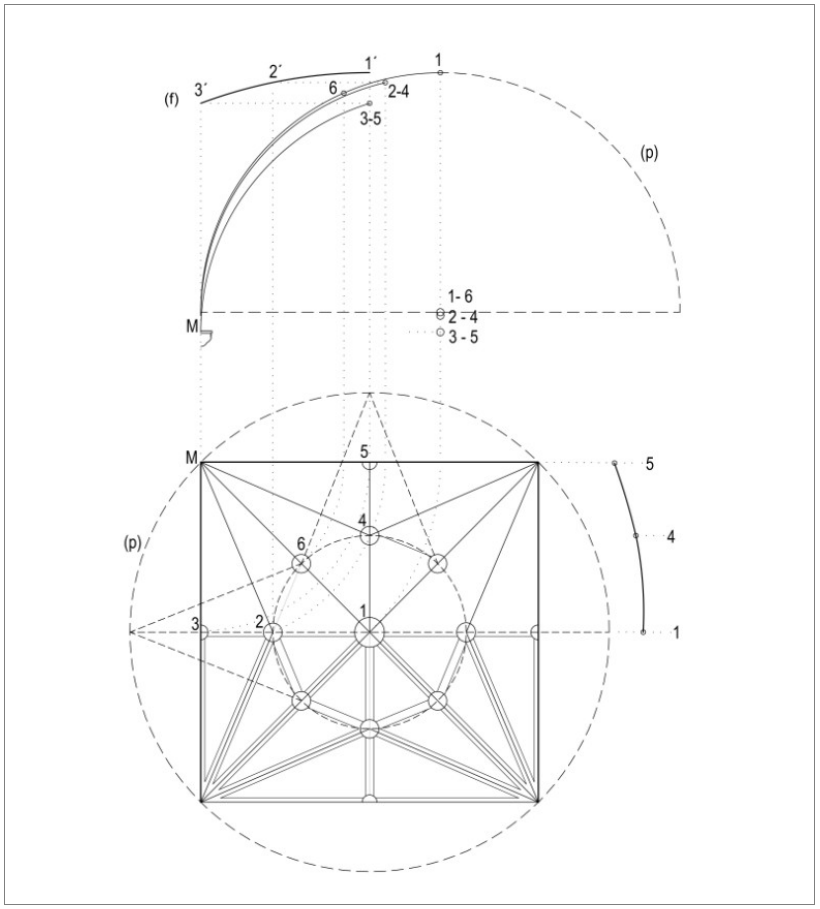


Figure 281. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la chapelle sud du transept du monastère de Jerónimos à Lisbonne.
Les nervures sont en arc de cercle, identiques à (p). Méthode de construction traditionnelle, où les arcs s'élèvent ou s'abaissent verticalement pour atteindre la hauteur des clefs, dans ce cas-ci déterminée par les lignes faîtières (f).

- Tiercerons : on projette verticalement les clefs (2) et (4) reprenant leurs distances en plan, à la même hauteur que (6), condition pour que l'octogone soit horizontal. On trace les tiercerons avec les mêmes deux arcs précédents en gardant le plus petit à la même hauteur et en infléchissant (p) pour atteindre la hauteur des clefs (2) et (4) :
- Formerets : à partir de (3') on localise la clef (3) et on trace le formeret M-3 et M-5, comme celui précédant infléchissant l'arc (p).

La méthode de conception de la chapelle nord est la même que pour les voûtes anglaises. Pour que les nervures atteignent la hauteur des clefs, le plus grand arc s'infléchit tangentiellement au plus petit arc.

Hypothèse de construction

- Diagonales : On reproduit le plan sur la plate-forme de travail. On place le cintre de la diagonale et les étais des clefs (1) et (6), déterminée au fil à plomb.
- Pour construire la voûte sud, on place des cintres pour les lignes faîtières jusqu'aux formerets, on trouve l'emplacement des clefs secondaires et on place les étais et des cintres des tiercerons.
- Pour construire la voûte nord, on place d'abord les étais des clefs 2 et 4 de l'octogone en suivant les marques de la plate-forme et à la hauteur de la clef 6 ; on dispose ensuite les cintres des tiercerons jusqu'à atteindre ses étais.
- Une fois posées les clefs, la construction des deux voûtes démarre à partir des quatre points d'appui simultanément (nervures, voûtains et remplissage des reins) ; en arrivant aux clefs intermédiaires, on construit les liernes de l'octogone et on poursuit la pose des voussoirs jusqu'au sommet de la voûte.

Concernant les détails constructifs, les deux voûtes ont des clefs similaires, elles sont toutes verticales et de forme cylindrique, sans branches, simple à tailler. Les voûtes diffèrent quant aux profils de leurs nervures : dans la chapelle sud, les nervures présentent toutes un profil et une épaisseur (0,33m) identiques, alors que, dans la chapelle nord, les ogives sont plus épaisses (0,39m). Les autres nervures de la chapelle nord semblent identiques aux nervures sud, tant en épaisseur qu'en profil.

Détails de construction

En septembre 2013, à l'heure où nous finissions la rédaction de cette thèse, visitant les travaux de restauration de la chapelle nord entamées par Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico (IGESPAR), nous avons pu observer de près des détails constructifs et pris quelques clichés, que nous présentons ici. Nous avons pu confirmer la verticalité des clefs (Figure 283A), le profil des nervures et la double courbure des voûtains entre les nervures.

Sur le mur nord, nous avons détecté deux crampons métalliques qui servaient à tirer les cordes pour sur place (Figure 283C),

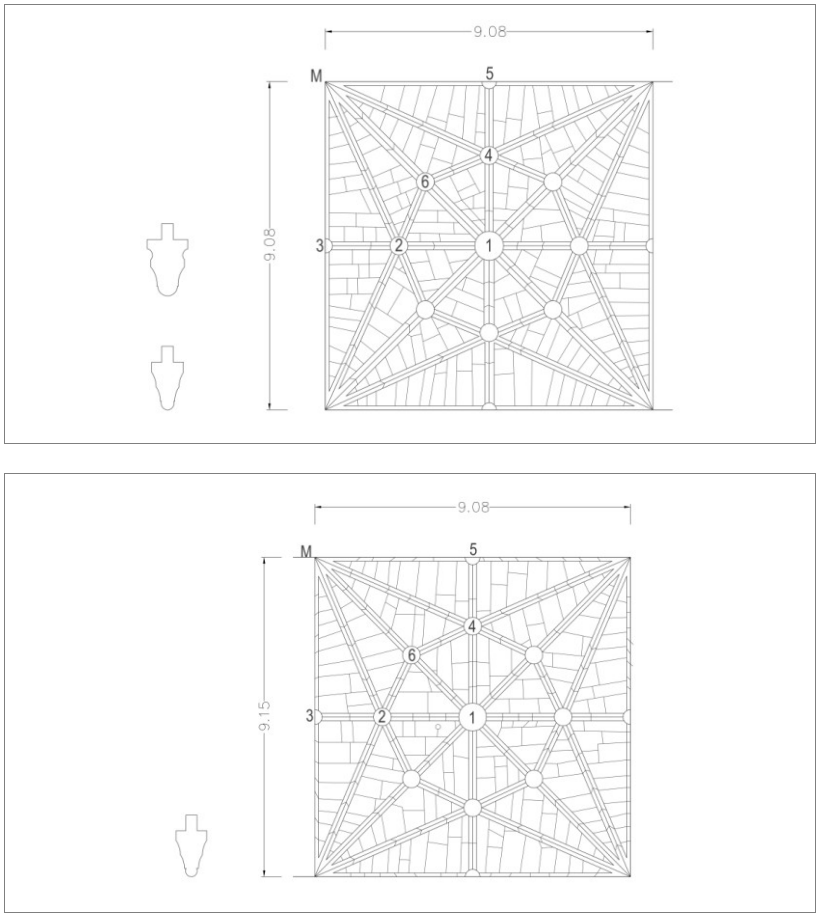


Figure 282. Plan des voussoirs et profils des nervures.
Dans la chapelle du nord (A), la diagonale présente un profil plus épais que les autres nervures (0,39m et 0,33m). Au sud (B), les nervures présentent un profil identique (0,30m). La disposition des voussoirs est concentrique en (A) et parallèle aux murs en (B).

normalement pour le tracé en plan. Nous avons mesuré 3,80 m entre un des crampons et le mur ouest, ce qui correspond exactement à la géométrie du plan que nous avions imaginé, c'est-à-dire l'alignement de la bissectrice de l'angle formé entre la diagonale et le formeret. Nous avons été fort étonnée de sa hauteur d'à peine de 2,10 m par rapport à la clef du formeret, ce qui est un niveau très élevé pour établir la plateforme de travail.

Nous avons observé deux autres détails intéressants : le dernier claveau d'un des tiercerons était coupé au bord, semble avoir été taillé sur place pour s'adapter à la clef préalablement placée (Figure 283). Un claveau de lierne de la ligne faîtière transversale, s'était détaché des voûtains, par manque de mortier ou autre (Figure 283.E). Nous avons observé que la nervure n'avait pas de queutage en saillie. Les voussoirs derrière la nervure étaient coplanaires.



A



B



C



D



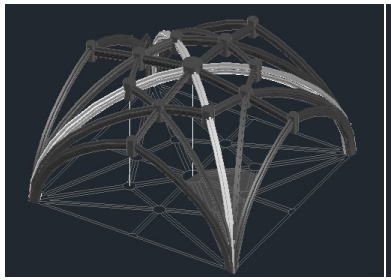
E



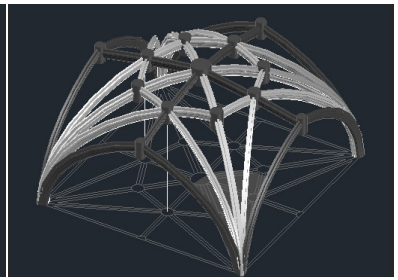
F

Figure 283. Photos prises de l'intrados pendant les travaux de restauration de la chapelle nord.

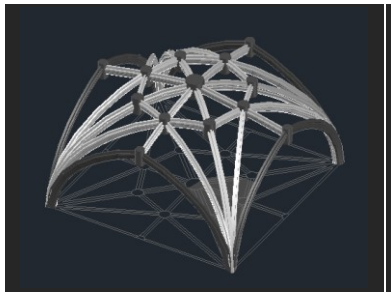
A. Clefs verticales.
B. Voûtains à double courbure entre les nervures.
C. Crampon métallique : ceux-ci servaient à tirer les cordes pour tracer le plan sur la plateforme de travail. Sa localisation correspond à notre hypothèse de tracé.
D. Clef de l'octogone, taillée de forme cylindrique, sans branche de raccordement aux nervures. Le tierceron est coupé au bord - probablement taillé sur place, pour s'adapter à la clef préalablement placée.
E. Claveau de la ligne faîtière transversale, détaché des voûtains. Son profil n'a pas de queutage en saillie, et à l'arrière les voussoirs sont coplanaires.
F. Marques d'outil denté (grain d'orge) sur la pierre et sur le mortier, éventuellement de travaux de restauration, pour enlever la couche de plâtre original.



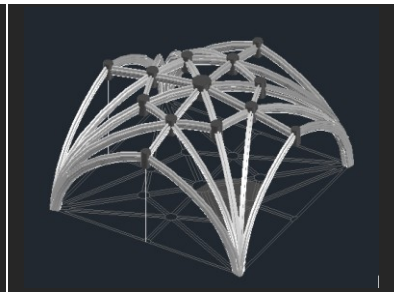
A



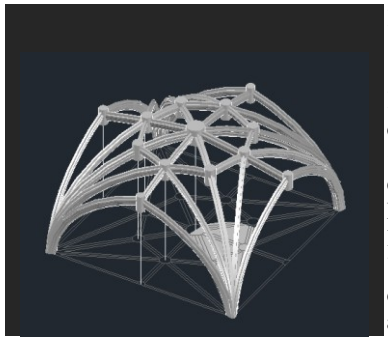
B



C

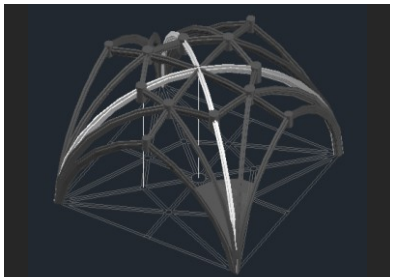


D

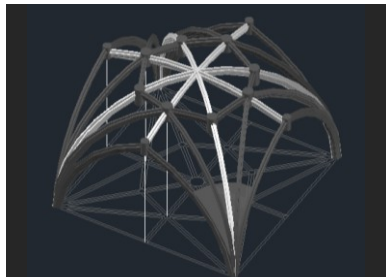


E

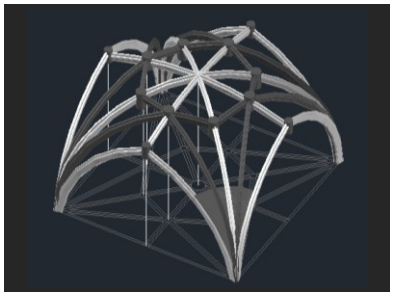
Figure 284. Hypothèse de construction de la voûte nord.
Cintrage : A. Diagonales et étais des clefs centrale et intermédiaires ; B. Étais des clefs, tiercerons et liernes de l'octogone ; D. Lignes faîtières.
Voûte : E. Pose des clefs, des claveaux, des voussoirs et remplissage des reins, à partir des appuis en simultané.



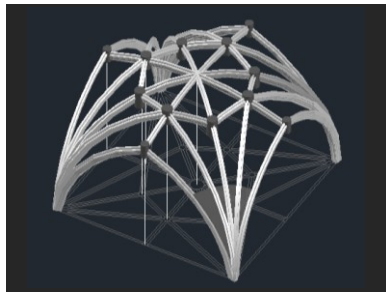
A



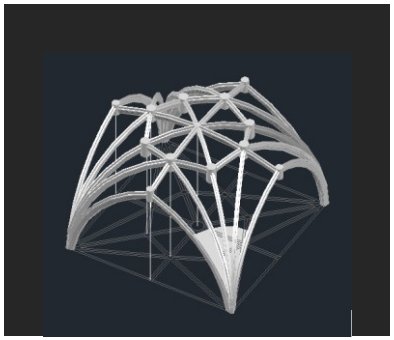
B



C



D



F

Figure 285. Hypothèse de construction de la voûte sud.
Cintrage : A. Diagonales et étais des clefs centrale et intermédiaires ; B. Lignes faîtières ; C. Étais des clefs ; D. Tiercerons et liernes de l'octogone.
Voûte : E. Pose des clefs, des claveaux, des voussoirs et remplissage des reins, à partir des appuis en simultané.

4.17.3 *Cloître inférieur*

Entre deux travées du couloir ouest du cloître, notre attention a été attirée sur une différence dans un détail du tas de charge (Figure 299) concernant les différentes formes des voûtes, ce qui nous a amené à relever l'ensemble des deux travées, pour pouvoir comparer les tracés du côté nord et sud du cloître. Comme pour les deux chapelles du transept, nous les présentons ensemble, pour comparer (de nouveau) les différentes méthodes d'élévation et de construction qui sont derrière les différentes formes.

Les deux travées possèdent le même plan presque carré recouvert d'une voûte à liernes en forme d'octogone centrale, structuré sur des croisées d'ogives et des tiercerons en étoile, le même plan que celui des chapelles.

Elles ont une largeur de 6,24m et une longueur de 7,01m à la travée du côté sud et 7,20m à celle du nord. La voûte sud a une hauteur de 6,79m, contre 6,91m au nord. Elles sont similaires en plan mais diffèrent quant à leur élévation.

Les voûtes ont les deux lignes faîtières définies par un même arc de cercle. La voûte nord est cependant un peu plus élevée que la voûte sud. Au nord, on peut inscrire sur la diagonale un arc en anse de panier centre au sol (voir annexe A37), comme nous avons tracée pour la voûte de la sacristie. Comme pour la sacristie, cet arc semble être utile d'un point de vue conceptuel mais pas pour la construction. Le relevé se rapproche plus du tracé d'un arc plus petit dont le rayon est égal à la longueur de la demi-diagonale en plan.

Au sud, l'arc de la diagonale est une anse de panier dont le rayon est égal à la largeur de la travée.

La différence formelle entre les deux voûtes est moins perceptible qu'entre les deux chapelles, parce que ces deux voûtes-ci sont construites avec des arcs en anse de panier. Mais si on observe la photo prise du couloir est, l'octogone central se détache (est plus visible) plus clairement dans la première travée nord. Une photo



Figure 286. Voûte du cloître inférieur du monastère de Jerónimos à Lisbonne.

prise des deux travées qui ont été relevées montrent que, dans la voûte sud (première sur la photo), la diagonale est un arc continu alors que la diagonale de la voûte nord est composée de deux arcs (Figure 286).

Comme pour les chapelles, nos relevés indiquent que les clefs intermédiaires des diagonales sud sont plus basses par rapport aux autres clefs de l'octogone (la différence est de 0,18m), alors que l'octogone central nord est à niveau (les différences de hauteur des clefs ne dépassent pas 0,05m).

Dans la voûte nord, la hauteur est déterminée par l'octogone central horizontal tandis qu'au sud, l'élévation des arcs est déterminée par la forme de la ligne faîtière. Nous confirmerons ces observations aux tracés des élévations.

Ces différences de forme entre les voûtes des chapelles et celles du cloître, nous amenait à penser à deux architectes différents. Mais nous y voyons plutôt une évolution de Castilho, tant au niveau du projet que de son savoir-faire pour la construction des voûtes. On ne peut écarter la possibilité d'y avoir eu des constructeurs différents pour un projet d'un seul architecte. Imaginons que Castilho ait construit les voûtes nord, tant dans les chapelles que le cloître, et que celles au sud aient été construites à un entrepreneur sous-traitant. Nous ne croyons pas à la possibilité de différencier Boitaca et Castilho, parce que les plans sont sûrement de Castilho, pas de Boitaca.

Nous présentons aux Figure 287 et Figure 288 les tracés des voûtes en plan et élévation.

Hypothèse de tracé en plan

- On trace les diagonales et les deux axes, longitudinal et transversal. On marque la clef centrale 1 et les clefs des formerets 3 et 5.
- Sur la voûte nord, on trace les tiercerons/octogone sur les bissectrices formées entre les arcs principaux.
- Sur la voûte sud, on trace les tiercerons/octogone, sur la droite tracée entre la console et le formeret opposé.

Hypothèse de tracé en élévation de la voûte sud

- Diagonale : on trace un arc en anse de panier dont l'arc principal (p) a un rayon égal à la largeur du plan. Sur cet arc, on marque la clef centrale 1 et celle intermédiaire (6), à partir de la distance M6 en plan;
- Lignes faîtières : on trace (f) passant par la clef (1); on place les clefs (3) et (5).
- Tiercerons et formerets: on projette verticalement les clefs jusqu'à leurs hauteurs tirées de (f). On trouve le centre de l'arc avec le rayon de celui de (p) et on trace les nervures. Le centre du formeret est situé un peu plus bas que celui du tierceron.

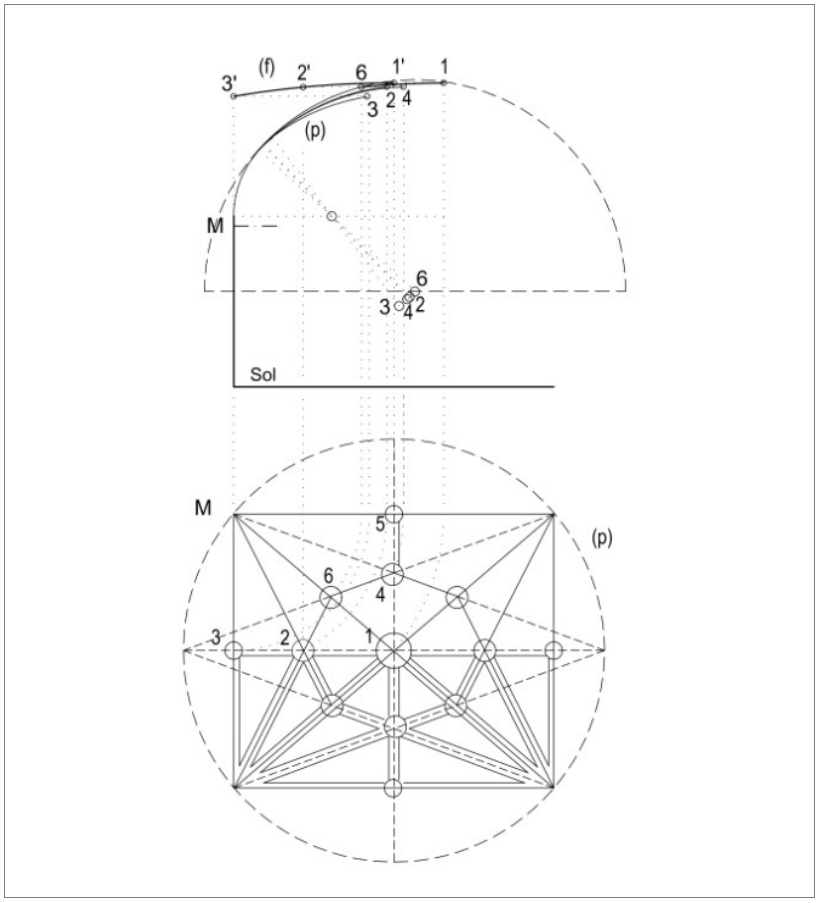


Figure 287. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte nord.
Les nervures sont en anse de panier, le plus grand arc est identique à (p).
Méthode de construction anglaise, où (p) pivote autour du centre du petit arc, pour atteindre la hauteur des clefs, ici déterminée par l'octogone horizontal.

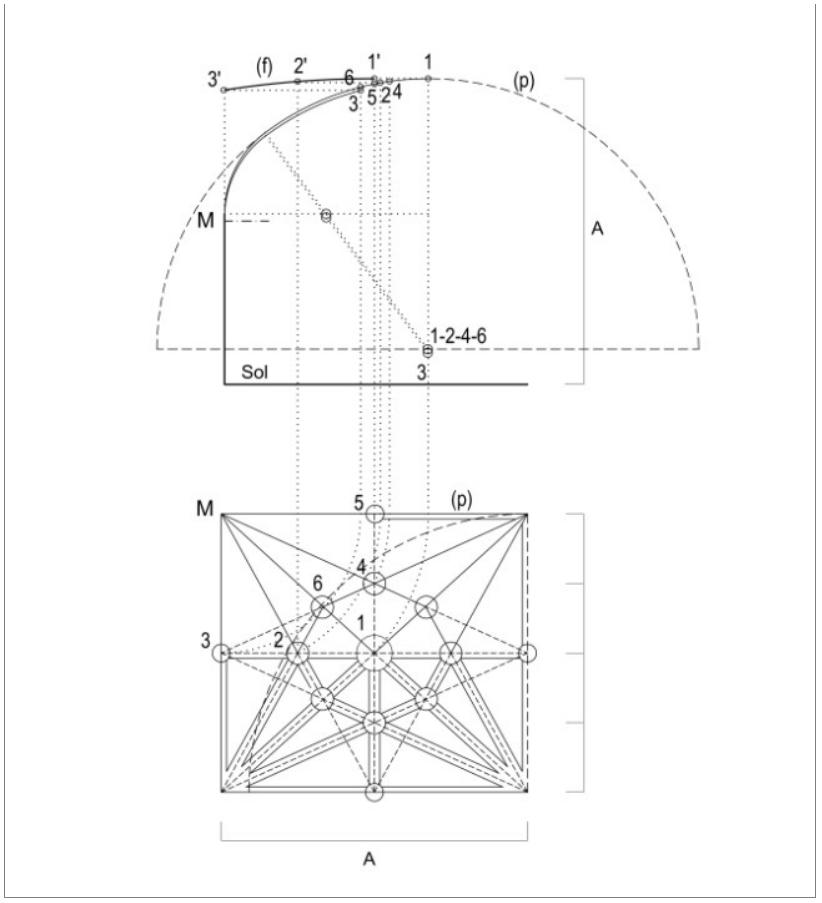


Figure 288. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte sud.
Les nervures sont en anse de panier. Méthode de construction traditionnelle, où les arcs s'élèvent ou s'abaissent verticalement pour atteindre la hauteur des clefs, dans ce cas-ci déterminée par les lignes faîtières (f).

Élévation de la voûte nord.

- Lignes faîtières : on trace (f) passant par la clef (1) de hauteur prédéterminée. On marque les clefs 2, 3, 4 et 5.
- Diagonale : on trace un arc en anse de panier, dont le rayon de l'arc principal (p) est égal à la demi-diagonale en plan. Cet arc doit passer par la clef 6, qui est à la même hauteur que les clefs 2 et 4 de l'octogone. Entre (1) et (6), on trace un arc similaire à (f). L'octogone prend ainsi une forme de coupole, puisque toutes les nervures rayonnantes à partir de la clef centrale ont la même courbe.
- Tiercerons et formerets : on projette verticalement leurs clefs jusqu'à leurs hauteurs tirées de (f). Pour aboutir à ces hauteurs, l'arc principal (p) s'abaisse autour du centre du petit arc.

Hypothèse de construction

- Lignes faîtières : le plan est reproduit sur la plate-forme de travail. On place l'étai de la clef centrale. On place les cintres correspondants à (f). À l'aide d'un fil à plomb, on localise et on place les étais des clefs 1, 2, 3 4, et 5.
- Diagonales : pour la voûte sud, on place le cintre de la diagonale jusqu'à la clef 1 et on place l'étai de la clef 6 marquée au fil à plomb. Pour la voûte nord, on place d'abord l'étai de la clef 6, avec la hauteur de l'étai 2 ou 4, et on place le cintre de la diagonale jusqu'à 6. Entre 1 et 6, on place un cintre de même courbe que (f).
- Tiercerons : on place les cintres des tiercerons jusqu'aux étais des clefs 2 et 4 et sur les faîtières ;
- Une fois posées les clefs, la construction des deux voûtes démarre simultanément à partir des quatre points d'appuis (nervures, voûtains et remplissage) ; en arrivant aux clefs intermédiaires, on pose les liernes de l'octogone et on poursuit la pose des voussoirs jusqu'au sommet de la voûte. Les profils des nervures sont différents mais leurs dimensions sont similaires (environ 0,30m, 1 ou 2 cm plus épaisses au nord). Au nord, les nervures diagonales sont identiques aux tiercerons. Les clefs sont toutes de forme cylindriques. Elles sont posées à la verticale au nord, puisque l'octogone est horizontal, tandis qu'au sud, les clefs intermédiaires des diagonales semblent inclinées, normalement perpendiculaire au plein des nervures.

Pour construire les voûtes, il aura suffi de connaître deux courbes - la courbe standard (p) et la ligne faîtière (f) - et la hauteur d'une clef - clef centrale ou formerets. À partir de la hauteur d'une clef, on peut poser les cerces qui donnent la hauteur de toutes les autres clefs.

Les deux voûtes utilisent la standardisation des nervures. Un seul arc, tracé sur la diagonale, est utilisé pour la construction de toutes les nervures.

Elles diffèrent dans la méthode de tracée l'élévation et dans la méthode de construction. Comme pour les chapelles, la voûte du sud découle d'un tracé (et construction) fait à partir de la rotation d'un

arc autour de la console; la hauteur des clefs des tiercerons dépend de la longueur de la nervure. La voûte du nord résulte d'une méthode de tracé et de construction fait à partir de la hauteur des clefs, préalablement conçu ; l'arc principal de l'anse de panier s'incline pour atteindre sa clef.

Les voûtes du sud utilisent la méthode traditionnelle des premières voûtes en croisée d'ogives. Les voûtes du nord utilisent la méthode anglaise de tracée et de construction de voûtes.

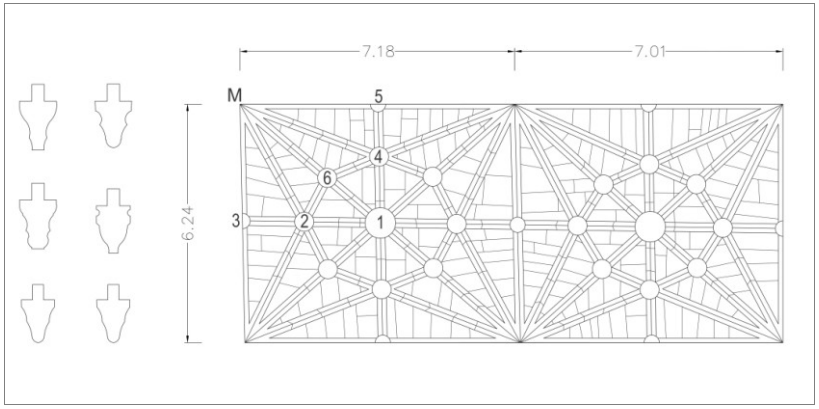


Figure 290. Plan des voussoirs et profils des nervures.
Profils des nervures. Voûte nord : diagonales et tiercerons (0,32m); transversales (0,32m); formerets et liernes (0,28m). Voûte sud : diagonales (0,30m); tiercerons (0,31m); formerets et liernes (0,28m).



Figure 289. Tas de charge entre la voûte sud et nord du cloître inférieur.

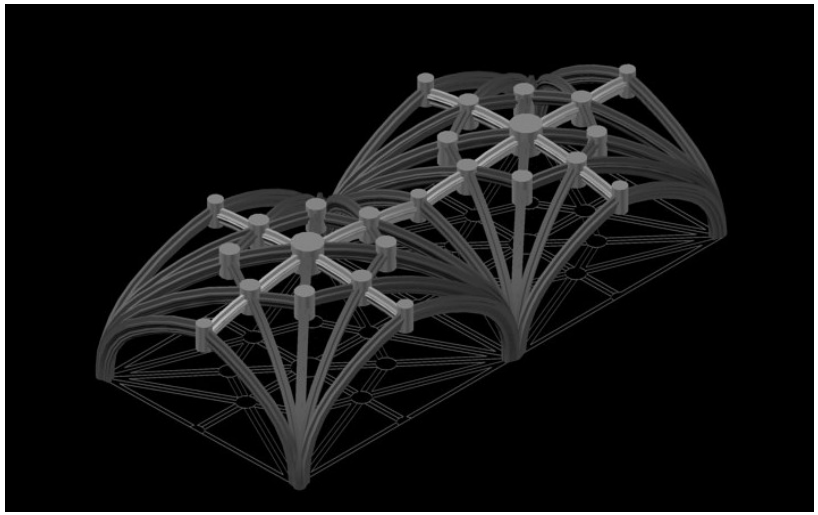


Figure 291. Dessin tridimensionnel des voûtes sud et nord du cloître inférieur.

4.17.4 *Réfectoire*

Le réfectoire du monastère de Jerónimos est recouvert d'une voûte à liernes en étoile à quatre branches. La structure principale est dépourvue d'ogives, on trouve juste des tiercerons en étoile, soit totalisant de huit branches en plan.

Le réfectoire possède en tout cinq travées. Celui relevée présente un plan de 9,00m sur 7,68m pour une hauteur de 7,85m, environ le double de la hauteur de la console, à 3,80m de hauteur. Les arcs naissent plus haut 0,95m que la console.

L'analyse de nos relevés indique qu'il existe un arc standard en anse de panier (p), qui sert à construire toutes les nervures. Le cercle principal de cet arc est égal à la circonférence qui circonscrit le plan de la travée. À l'exception du formeret, toutes les nervures ont le petit arc de l'anse de panier au même niveau, le grand arc de cercle s'incline à la hauteur de chaque clef. Ceci est la méthode utilisé pour les exemples précédant, ceux de la chapelle et du cloître nord du monastère.

Les deux lignes faîtières de la voûte correspondent à un arc de cercle dont le rayon est égal à la moitié de la longueur de la diagonale du réfectoire. Le sommet de la voûte est ainsi une coupole surbaissée.

Hypothèse de tracé en plan

- On trace d'abord des diagonales et les axes de la voûte. Marquer les clefs centrales 1 et les clefs des formerets et des doubleaux, 2 et 3.
- On trace une droite entre 2 et 3 et les appuis opposés. Leurs intersections donnent les clefs des tiercerons, 4 et 5. À partir de ces clefs, tracer les tiercerons et les liernes jusqu'à la clef centrale.



Figure 292. Voûte du réfectoire du monastère de Jerónimos à Lisbonne.

Hypothèse de tracé en élévation

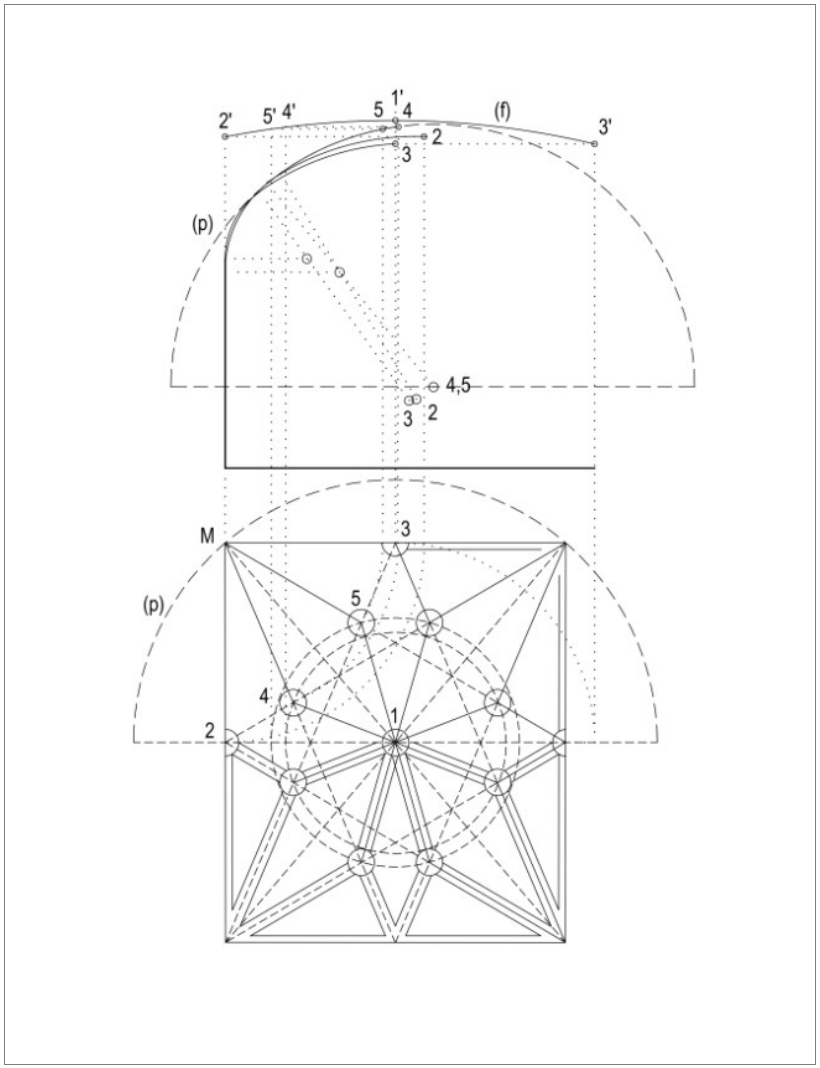
- À partir d'une hauteur de clef centrale prédéterminée, on trace l'arc de cercle de la ligne de faîte. Marquer 1', 2' et 3' selon les distances en plan.
- Projeter verticalement les clefs 2 et 3, à partir des distances M-2 et M-3 en plan et de leurs hauteurs 2' et 3'marquées sur (f). Trouver les centres de l'arc en anse de panier, dont le principal a le rayon égal à la demi-diagonale en plan. Le rayon du petit arc du formeret M-3 est plus court que celui des restantes nervures.
- Projeter verticalement les clefs 4 et 5, à partir des hauteurs de 4' et 5'. Une fois trouvé leur emplacement sur le plan en élévation, on trace les tiercerons, avec les mêmes arcs de l'anse de panier de la transversale M-2. Le petit arc cercle est coïncident, le grand arc de cercle, s'élève pour aboutir aux clefs 4 et 5.

Les liernes n'ont pas besoin d'être tracés, parce qu'ils sont construits avec la même courbe de (p) et leurs clefs n'ont pas de branches, elles sont cylindriques.

Hypothèse de construction

- On construit les formerets et on place une cerce transversale de courbe (f) entre les murs.
- On trouve l'emplacement de la clef 1 au fil à plomb et on place l'étai correspondant.
- On reporte les distances de 1-4 et 1-5 sur (f) et on prend les hauteurs des clefs 4 et 5. À l'emplacement des clefs sur la plateforme de travail, on place des étais avec les hauteurs prisent.
- Une fois placés les étais, on dispose les cintres des tiercerons et des liernes, de même courbe (p).
- Les tas de charge sont construits selon le petit arc de cercle. Pour les nervures, nous relevons trois profils différents. Le plus épais pour les doubleaux (0,45m) décoré avec des cordes, les tiercerons et liernes sont identiques (0,40m) et les dimensions des formerets sont les mêmes que les précédentes (0,40m).
- Une fois le cintrage terminé, les clefs sont posées verticalement. Leur forme est cylindrique, comme ailleurs dans le monastère. Les claveaux et les voussoirs sont ensuite posés, de manière concentrique par rapport à la clef centrale pour la plupart.

Pour construire la voûte, il suffit de connaître la hauteur d'une clef (le formeret) et les courbes (p) et (f), celle-ci donne la hauteur de toutes les clefs.



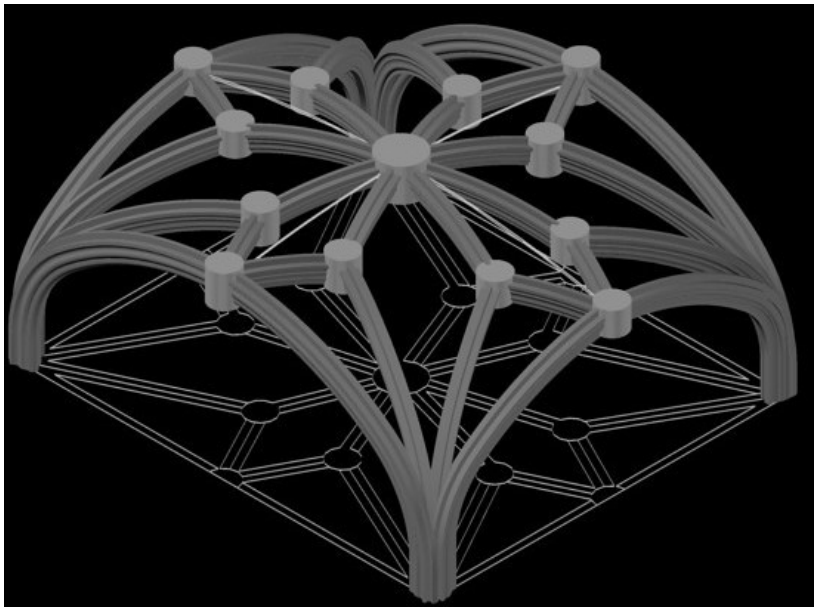


Figure 293. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte du réfectoire du monastère de Jerónimos à Lisbonne.
Les nervures principales sont en anse de panier, dont le plus grand arc est identique à (p), excepté le formeret. L'arc principal (p) pivote autour du centre du petit arc, pour atteindre les clefs. Leurs hauteurs sont déterminées par les lignes faîtières (f). La forme de (f) correspond à un arc de cercle, dont le rayon est égal à la moitié de la longueur de la diagonale en plan du réfectoire (annexe A39).

Figure 294. Dessin tridimensionnel de la voûte du réfectoire du monastère de Jerónimos à Lisbonne.

4.17.5 *Nef*

Nous l'avons vu au chapitre précédent, derrière l'apparente complexité de nervures, la conception de la voûte de la nef part d'une structure plus simple, faite de voûtes à liernes et de tiercerons, en forme d'étoiles.

La diagonale n'est matérialisée par aucune nervure, mais la hauteur de la clef au centre de chaque travée correspond au rayon d'un demi-cercle sur la diagonale, comme dans les églises-halles de Viseu, Freixo de Espada-à-Cinta, Arronches et Moncorvo. Les trois clefs servent à tracer la ligne faîtière (f).

Ce sont les nervures droites en plan qui donnent la forme de la voûte. Les *combados* font partie des voûtains et font partie intégrante du remplissage. Leur tracé en élévation n'est pas nécessaire. La plupart des *combados* relient certaines clefs à une même hauteur, sauf les plus courts qui suivent la forme transversale du berceau. Pour tailler leurs claveaux, il suffit de tracer la courbe du plan et de leur profil.

La taille des clefs est également facilitée, puisqu'elles sont toutes cylindriques et sans branches.

La standardisation permet aussi de simplifier la taille des nervures. Nos relevés (annexe A45-46) indiquent que toutes les nervures, liernes inclus, ont le même arc de cercle (p), de rayon égal à la moitié de la diagonale en plan, celle du bas côté.

Si on fait le rapport entre d'une part l'arc de cercle (f) et de l'autre le plan et l'élévation de l'église, nous constatons que le diamètre de (f) a la même longueur que la diagonale en plan des quatre travées principales de la nef (sans le narthex) (Figure 117).

L'élévation des arcs n'est pas complexe, comme nous allons voir, il suffit de suivre la hauteur déterminée par la ligne faîtière, comme pour les autres exemples précédents.

Rappelons que la travée centrale est un carré de 10,70 sur 10,66m et



Figure 295. Voûte de la nef du monastère de Jerónimos à Lisbonne.

que des diagonales à 60° définissent des triangles équilatéraux sur les travées latérales. Nous allons tracer le plan et l'élévation des nervures pour un module de la nef : 1-5 est l'axe longitudinal et 1-4 l'axe transversal. M et P sont les appuis, soit des consoles soit des piliers.

Hypothèse de tracé en plan

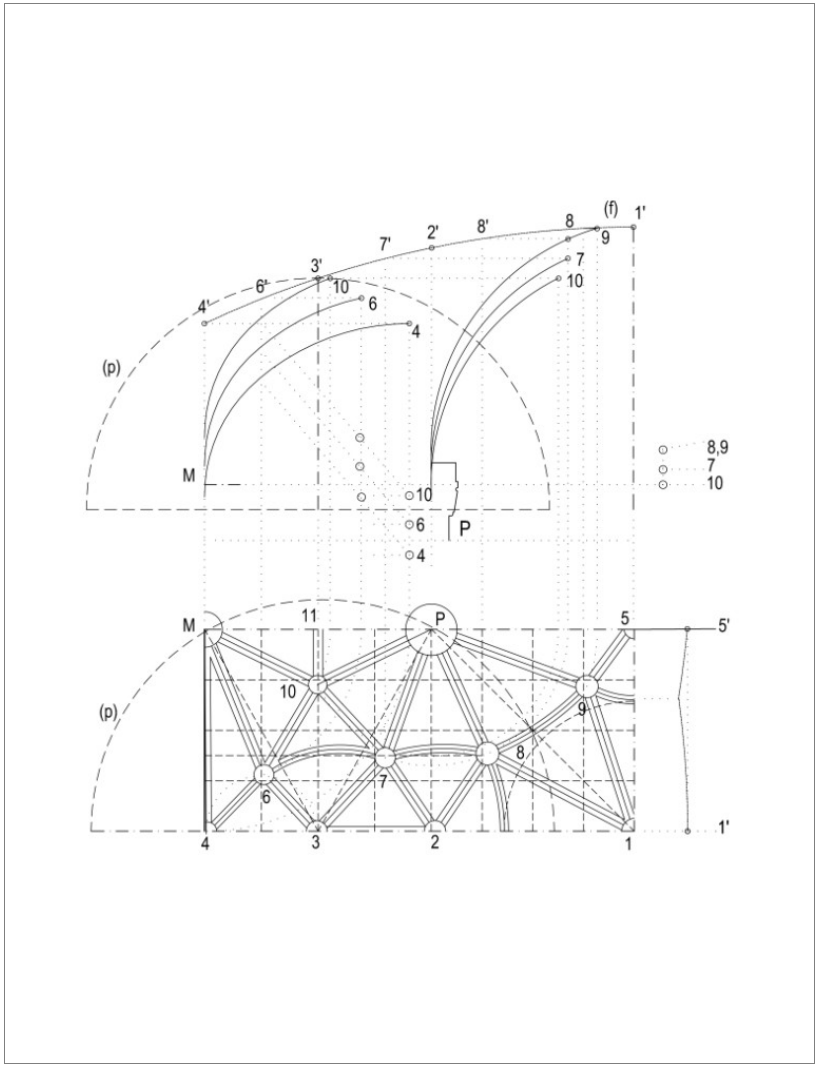
- Sur les deux axes, on pointe les clefs principales 1, 2, 3, 4 et 5.
- Les clefs secondaires respectent une trame qui divise chaque demi-travée en quatre dans le sens transversal et longitudinal. L'intersection des lignes de cette trame donne les clefs des tiercerons 6, 7, 9 et 10. Les clefs 7 et 8 sont au milieu d'une droite entre 3 et 10. C'est à partir de cette trame qu'on trace l'élévation et qu'on construit la voûte.

Hypothèse de tracé en élévation

- Ligne faîtière transversale (f) : on projette verticalement les clefs centrales 1' et 3' avec leurs distances à P dans le plan. On trace la ligne faîtière courbe à partir de 3 points (la clef centrale 1' et les deux latérales de chaque travée. On pointe sur (f) les clefs 2, 3 et 4 qui se trouvent sur cet axe.
- Pour trouver les hauteurs des clefs qui ne sont pas sur la ligne faîtière, on pointe sur (f) les clefs secondaires 6, 7, 8 et 9, à partir de la grille dessinée en plan.
- Ligne faîtière longitudinale : la ligne faîtière est horizontale, les deux clefs 1 et 5 sont à une même hauteur.
- Tiercerons : la méthode pour tracer les tiercerons est la même que pour les autres voûtes déjà exposées ici. On tire les longueurs des tiercerons en plan et on en fait la projection verticale jusqu'à leurs hauteurs pointées en (f). À partir de ses points on trouve le centre de l'arc, qui sera tracé avec le même rayon de (p). Les nervures du bas-côté sont des anses de panier dont le plus grand rayon est identique à celui de (p). Dans la travée centrale, toutes les clefs sont en arc de cercle (p). Les nervures de chaque travée sont tracées avec les mêmes arcs qui s'élèvent ou s'abaissent pour atteindre la hauteur des clefs.
- Liernes: ces nervures n'ont pas besoin d'être tracées car nous avons vu que les clefs sont cylindriques et dépourvues de branches. Nous avons vu aussi (cf. annexe A47) que les liernes ont la même courbure que (p). Pour la construction, il suffit d'adapter cette courbe à l'espace entre les clefs.

Hypothèse de construction

- Reproduction du plan d'une travée sur la plate-forme de travail.



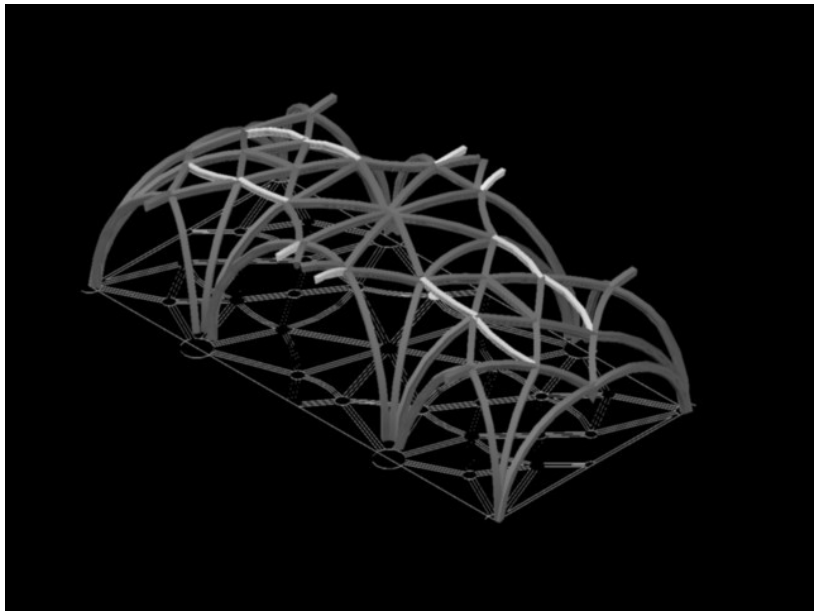


Figure 296. Hypothèse de tracé en plan et en élévation de la voûte de la nef du monastère de Jerónimos à Lisbonne.
Dessin d'un module représentatif de la nef. L'arc principal (p) sert à tracer toutes les nervures, en arc de cercle dans la nef et en anse de panier dans les bas-côtés. Les nervures montent ou s'abaissent verticalement pour atteindre la hauteur des clefs. Les hauteurs sont tirées de la ligne faîtière transversale (f). Le rayon de (f) est déterminé soit par les trois clefs centrales des travées, soit par la longueur de la demi-diagonale en plan des quatre travées principales de la nef (Figure 117).

Figure 297. Dessin tridimensionnel de la voûte.
En blanc, les *combados* aux limites de la surface en berceau.

- Ligne faîtière transversale : à l'aide d'une corde, on mesure la demi-longueur des diagonales en plan pour obtenir la hauteur des clefs centrales (1 et 3) de la nef et des bas-côtés prise à partir du niveau plus bas du chapiteau. On dispose les étais correspondants et on place la cerce courbe entre les étais de ces trois clefs.
- Lignes faîtières longitudinales : on dispose les étais des clefs 5 et 10 en reprenant les hauteurs des clefs 1 et 3.
- Tiercerons : à partir du plan reproduit sur la plate-forme, on trouve au fil à plomb les hauteurs des clefs secondaires 6, 7, 8 et 9 sur (f), comme on l'a expliqué pour l'élévation. Avec ces hauteurs, on pose les étais à l'emplacement des clefs sur la plateforme. Après avoir placé tous les étais, on dispose les cintres des tiercerons.
- Liernes : les liernes servent à relier tous les tiercerons, à fermer des triangles et losanges et à rendre la structure plus stable. On ferme d'abord les bas-côtés. On pose les cintres autour de la console M jusqu'à la clef 2. Dans la nef, on relie les tiercerons des colonnes des quatre côtés et on place les cintres des liernes radiaux de l'octogone central. Les cintres en bois sont terminés.
- On commence à poser les clefs. On part ensuite de tous les appuis simultanément (nervures, voûtains et remplissage) de manière à ce que la structure reste en équilibre. On ferme d'abord les reins. La voûte en berceau est sans doute exécutée à partir les murs jusqu'à l'octogone. Dès qu'on a fini de remplir les reins, on place les *combados* et on poursuit la pose des voussoirs conformément à la nouvelle forme en berceau du sommet. Pour terminer, on ferme les coupoles formées par l'octogone et par le carré central partant des colonnes vers les clefs centrales.

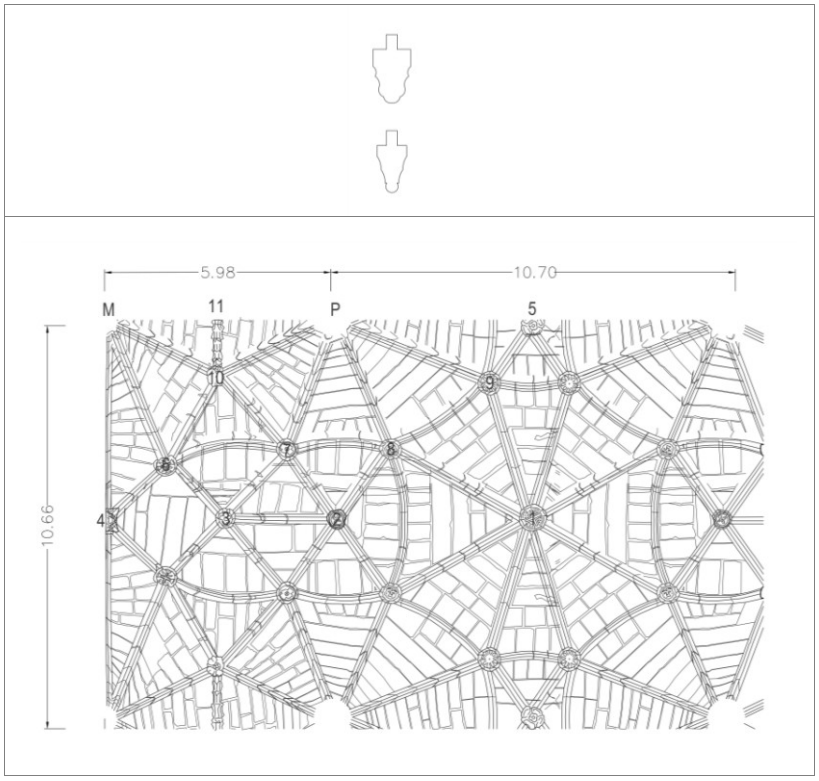


Figure 298. Plan des voussoirs et profils des nervures.
Les voussoirs sont disposés entre chaque paire de nervures concentriquement par rapport aux clefs centrales. Les tiercerons et les liernes sont identiques et plus grands (0,40m x 0,30m) que les *combados* (0,35m x 0,22m).

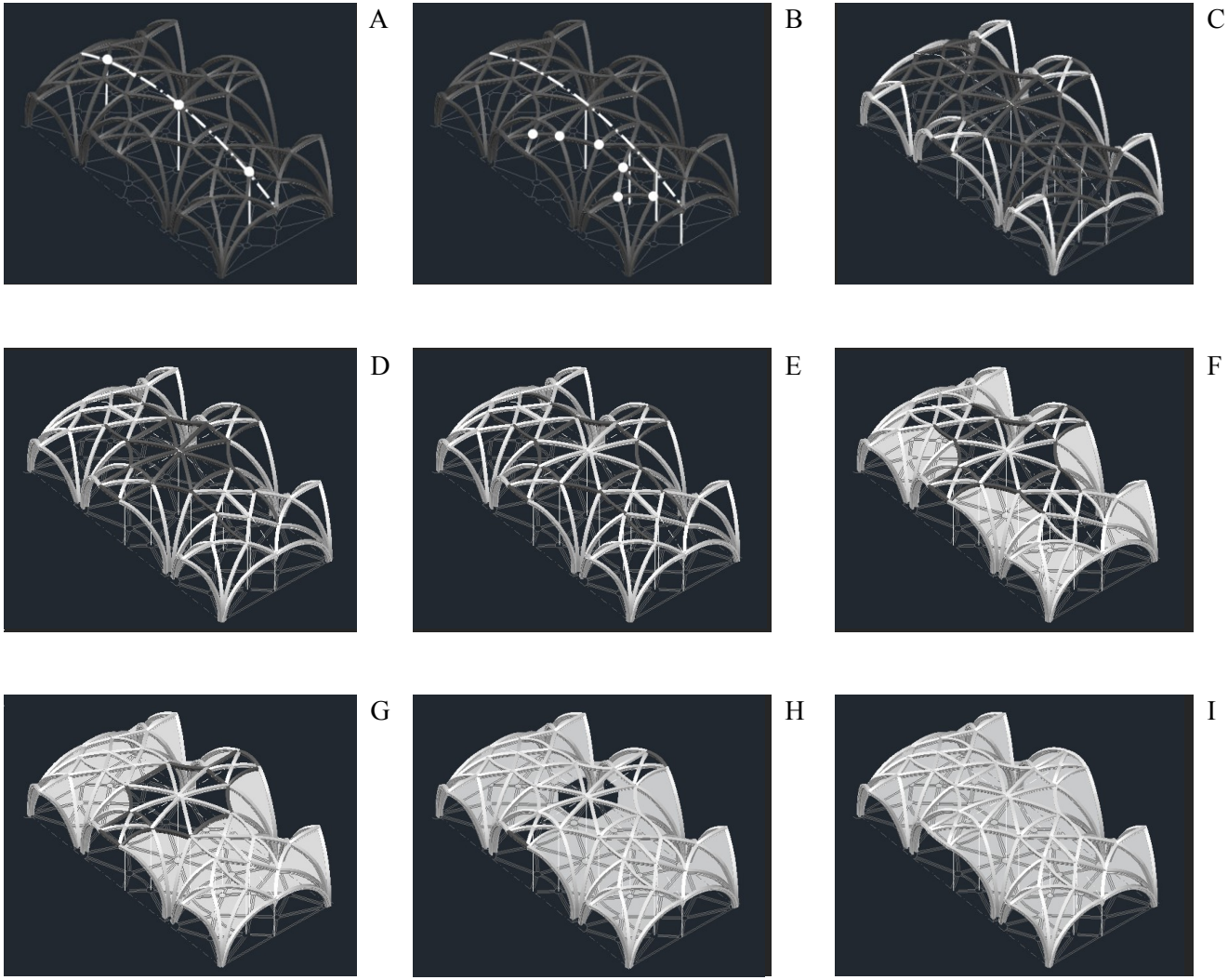


Figure 299. Hypothèse de construction.

Cintrage : A. Placement des trois étais des clefs centrales, de hauteur égale à la moitié de la diagonale en plan ; pose de la cerce transversale ; B. à partir de la trame du plan, on trouve au fil à plomb, à partir de la cerce, les hauteurs des clefs secondaires (5, 6, 7, 8, 9, 10) et on place leurs étais ; C. Tiercerons et liernes transversaux ; D. Tiercerons et liernes des bas-côtés ; E. Liernes de l'octogone.

Reins : F. Pose des clefs, claveaux, voussoirs et remplissage, à partir de tous les appuis en simultané.

Sommet : G. Pose des *combados* et des voussoirs des bas-côtés ; H. *Combados* et voussoirs de la nef ; I. Fermeture des carrés et de l'octogone central.

4.17.6 *Transept*

La voûte du transept de l'église Santa Maria de Belém n'est pas un berceau, comme on le pense souvent à cause de ses importants arcs doubleaux qui partent des colonnes intermédiaires entre la nef et le transept. La forme de cette voûte est inhabituelle puisque celle-ci est composée de deux arcs doubleaux, d'une ligne faîtière principale longitudinale et de six croisées d'ogives. Les autres liernes relient ses arcs principaux sans forme déterminée, raison pour laquelle les six losanges qui sont au sommet de la voûte sont brisés, ce qui est visible à l'œil nu.

On remarque le rectangle central délimité par des liernes horizontaux qui relient les six croisées. Il s'agit de lignes faîtières secondaires. Ce rectangle, comme pour la voûte du chapitre à Tomar, crée une surface surbaissée au centre de la voûte, où les arcs principaux – ogives et nervure faîtière - se subdivisent (Figure 303).

L'annexe (A49-50) montre que les arcs dirigés vers le centre de la voûte sont composés de deux courbes : l'arc principal (p) qui part des appuis, et l'arc (f), ligne faîtière longitudinale représentée par M3-1, qui part du rectangle. Toute la voûte peut être construite avec ces deux arcs, sauf les arcs doubleaux, qui sont en demi-cercle. Les doubleaux qui séparent le transept de la nef sont alignés sur la hauteur de la nef.

Nous pouvons voir sur la figure d'ensemble que le rayon de (f) est égal à la longueur d'une ogive et que sa circonférence est inscrite dans la largeur totale de l'église.

Nous présentons des plans complets pour expliquer le tracé en plan. Le tracé en élévation représente le quart du plan.



Figure 300. Voûte du transept du monastère de Jerónimos à Lisbonne.

Hypothèse de tracé en plan

- Sur le plan rectangulaire de la voûte, on trace deux arcs doubleaux à partir des colonnes qui donnent sur la nef (P). À l'opposé des colonnes on place deux consoles.
- Lignes faîtières principales : on trace les axes longitudinal et transversal de la voûte, dont l'intersection donne la clef centrale 1. Sur l'axe longitudinal, on pointe la clef 2, et la console M2. Sur l'axe transversal on pointe la clef 5. La voûte est ainsi divisée en six *carrés*. Des consoles sont placées aux angles des murs, il y a en tout dix appuis.
- Ogives : on trace des droites entre les appuis, en angle d'environs 45º. Il en résulte un plan similaire à six croisées d'ogives. À l'intersection des croisées, on pointe les clefs centrales 4 et 7.
- Lignes faîtières secondaires : on trace des axes longitudinal et transversal entre les six carrés. À l'intersection de ces lignes avec les précédentes, on pointe les clefs 3, 4, 6 et 7.
- Liernes : on trace des lignes parallèles aux ogives, qui forment des losanges (clefs 3, 6, 8, 9) au centre de chacune des six croisées.
- Tiercerons : on divise les côtés des losanges en quatre, on obtient les clefs des tiercerons.
- *Combados* : aux angles de ces losanges, on trace des circonférences de rayon mesurant ¼ du coté du losange.

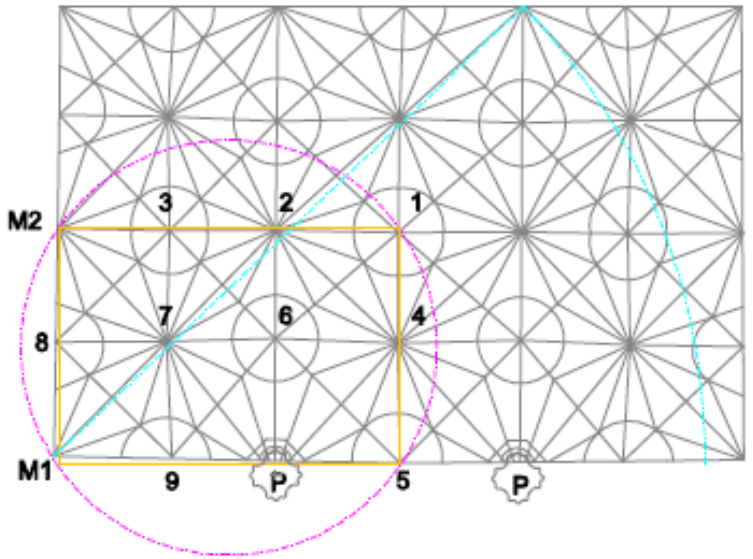


Figure 301. Hypothèse de tracé en plan du transept du monastère de Jerónimos à Lisbonne.
Le tracé de l'élévation sera analysé à partir du module ici représenté en jaune.
Le plan est divisé en six carrés par deux arcs doubleaux qui partent des piliers (P) et par la ligne faîtière longitudinale (M2-1). Des ogives à 45º forment deux croisées d'ogives principales (la ligne bleue représente une ogive principale) et six croisées d'ogives secondaires (M2-P est une ogive secondaire).
Pour l'élévation, deux arcs standards sont tracés à partir du plan: l'arc bleu correspond à l'arc de la ligne faîtière et il sert à tracer toutes les nervures du sommet. L'arc rouge sert à tracer les nervures qui partent des appuis.

Hypothèse de tracé en élévation

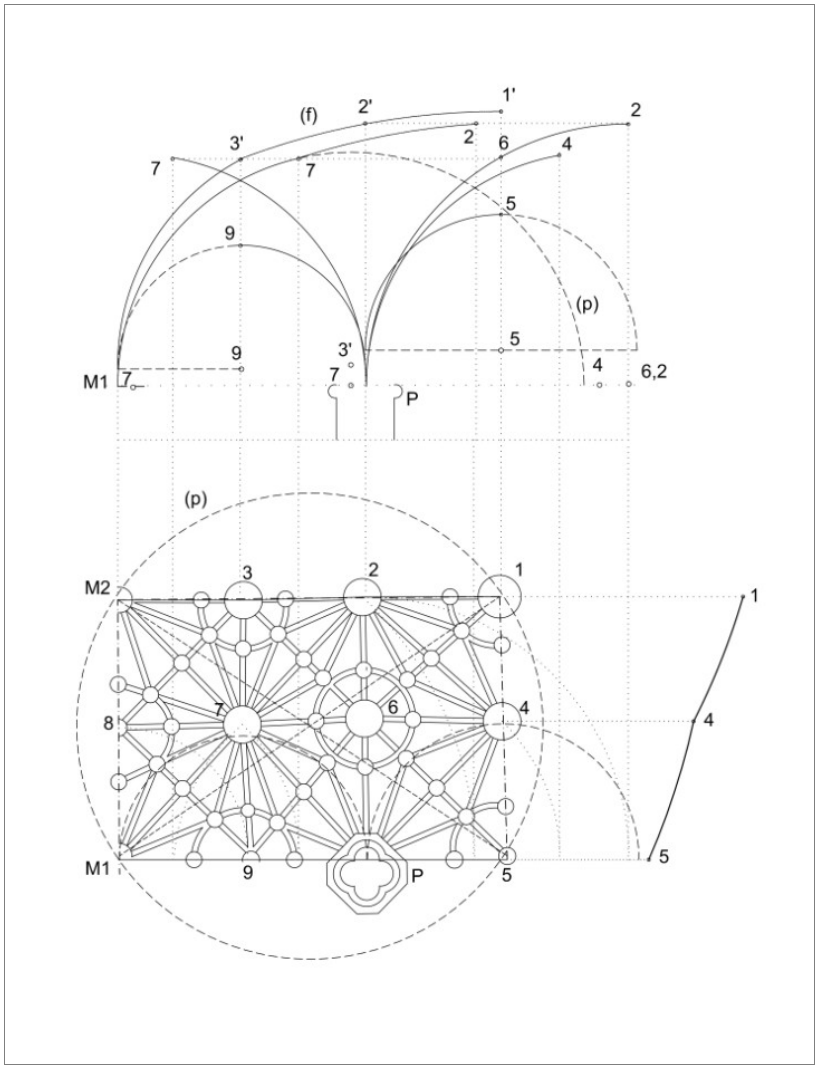
- Doubleaux (P-2) : au niveau des chapiteaux on trace les arcs doubleaux, en plein cintre et on pointe la clef centrale (2). Sur l'arc, on pointe la clef intermédiaire 6, à partir de la distance (2-6) en plan.
- Ligne faîtière longitudinale (1-3) : on pointe 2' et 3' avec les hauteurs des clefs 2 et 6 de l'arc doubleau. Entre 3' et 2', on trace un arc de rayon égal à (f), qui est le double de M1-2. Entre 3' et M1, on trace le petit arc de rayon égal à (p), qui est la moitié de M1-1. On pointe 1'.
- Ogive (M1-2) : on reporte sa longueur au plan de l'élévation. On projette verticalement les clefs 2 et 7 en tirant leurs hauteurs à partir de (f) ; la hauteur de 7 est égale à celle de 3 et de 6. Entre M1 et 7, l'ogive a le même rayon que (p) ; entre 7 et 2, la courbe est celle de (f).
- Ogive (P-4) : la méthode est identique à la précédente. Notre relevé indique que la clef 4 est légèrement plus élevée que la clef 7 parce que les deux nervures M1-7 et P-4 ont probablement été construites avec le même cintre à la même hauteur.
- Tiercerons : nous n'avons pas relevé les tiercerons, mais par observation sur place, ces arcs doivent être identiques à (p) ; ils s'élèvent ou s'abaissent, en fonction de la hauteur de clef à atteindre.
- Arcs doubleaux entre le transept et la nef : reprenant la hauteur déterminée par la voûte de la nef (clefs 1 et 2), on trace des arcs en plein cintre à différents niveaux entre les appuis (M1-P) et on y pointe les clefs 5 et 9.

Les liernes ne doivent pas êtres tracées en élévation. Ils ont tous la même courbure, qui est celle du grand arc de la ligne faîtière. Pour la construction, ils s'intègrent entre les clefs des tiercerons. Nous avons déjà évoqué ces lignes brisées qui parcourent la voûte.

Hypothèse de construction

Après avoir établi les tas de charges, placé la plateforme de travail et reproduit le plan sur celui-ci, on pose les cintres des nervures.

Outre les doubleaux et les formerets, on n'utilise que deux arcs pour construire les cintres et tailler les nervures : les nervures sont construites avec un arc identique à (p) entre les appuis jusqu'aux lignes faîtières secondaires (souligné en blanc dans le dessin tridimensionnel, Figure 302) et avec un arc identique à (f) à partir de ces lignes vers le sommet.



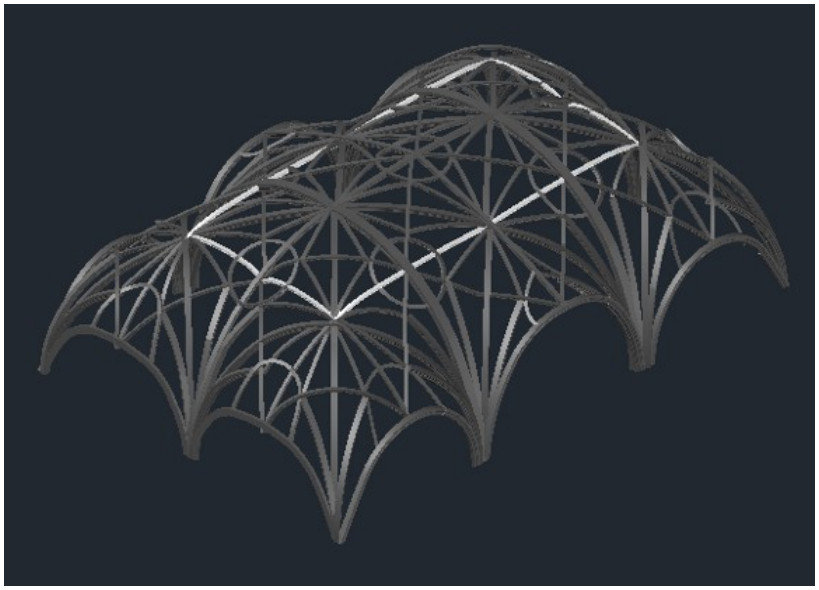


Figure 302. Hypothèse de tracé en plan et en élévation.
Les doubleaux sont tracés en demi-cercle. La ligne faîtière (f) est en anse de panier, dont le grand arc est centré au niveau du sol (Figure 117.). L'arc principal (p) sert à tracer toutes les nervures entre les appuis et la ligne faîtière secondaire. Au sommet, (f) devient l'arc standard.

Figure 303. Dessin tridimensionnel de la voûte.
La voûte du transept est constituée de six croisées d'ogives (Figure 120). Le rectangle central souligné en blanc, représente les lignes faîtières qui relient les six croisées. Ce rectangle permet d'élargir la surface au sommet de la voûte. Le rayon des nervures construites en dessous du rectangle est égal à celui de (p) et celui des nervures du sommet est égal au rayon de (f).

La construction de la voûte a du être faite en une fois, afin de garantir la stabilité de la structure. Nous expliquons, pour notre module, la séquence de construction. Des dessins tridimensionnels nous aideront à comprendre l'évolution du cintrage et la création de la forme de cette voûte.

- Doubleaux vers la nef (M1-P-5) : on pose des cintres en demi-cercle à partir des hauteurs définis par la nef (clefs 5 et 9).
- Doubleaux (P-2) : on pose les cintres des arcs doubleaux en plein cintre à partir des chapiteaux. À l'aide d'un fil à plomb, on localise la clef centrale 2 et la clef intermédiaire 6. On pose des étais et on place des étais pour les clefs 3 et 7 et 4 en reprenant la hauteur de 6.
- Ligne faîtière longitudinale (M2-1) : on place le cintre (p) entre M2 et la clef 3 ; à partir de 3 on place un cintre de courbe (f) passant par la clef 2, jusqu'à la clef opposée de 3. On trouve l'emplacement de la clef centrale 1 au fil à plomb et on place un étai pour 1.
- Ogives : on place des cintres égaux à (p) entre les appuis et les clefs 4 et 7 ; entre (7) et (2) on place un cintre égal à (f).
- Lignes faîtières secondaires : on place des cintres entre les clefs 4, 6, 7 et 8 ; et entre les clefs 3, 7 et 9.
- Tiercerons et liernes : entre les lignes faîtières précédentes, on dispose les étais et les cintres des tiercerons et des liernes qui forment des losanges à 45º en plan. Le cintre (p) sert aux tiercerons et (f) aux liernes.

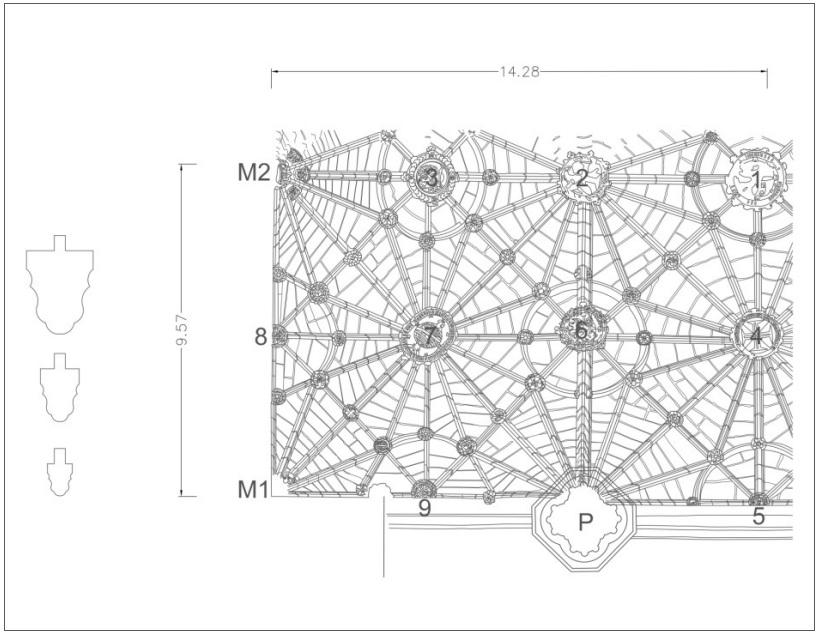


Figure 304. Plan des voussoirs et profils des nervures.
Les voussoirs sont disposés entre chaque paire de nervures. Grâce aux *combados*, leur disposition est concentrique par rapport à toutes les clefs principales.
Les nervures présentent des profils différents, plus épais d'abord dans les doubleaux (0,60m), moins épais dans les tiercerons (0,38m) et les liernes (0,23m), ces derniers étant identiques aux *combados*

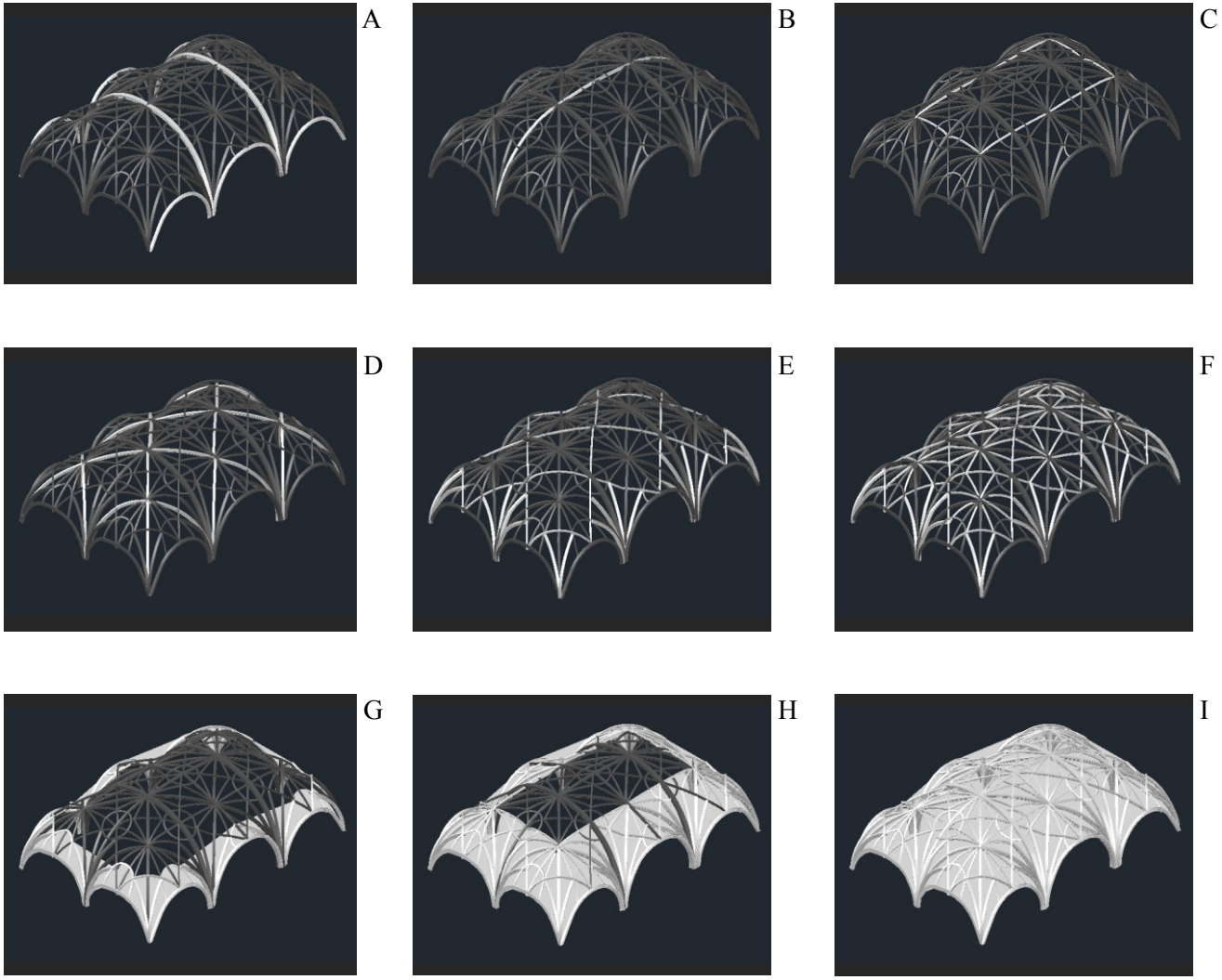


Figure 305. Hypothèse de construction.

Cintrage :
A. Doubleaux et étais des clefs centrales et intermédiaires (2 et 6) ;
B. Ligne faîtière, de rayon identique à (p) jusqu'à la clef 3, et identique à (f) au sommet; étai de la clef centrale 1 ;
C. Étais des clefs 3, 4 et 7 de hauteur identique à 6 (le rectangle) ;
D. Ogives de rayon identique à (p) jusqu'au rectangle et (f) au sommet;
E. Tiercerons identiques à (p) ;
F. Liernes reliant les clefs secondaires (leurs formes sont brisées).

Reins :
G. Pose des clefs principales ; pose des claveaux, voussoirs et remplissage, à partir de tous les appuis en simultané.

Sommet :
H. I. Pose des voussoirs de forme concentrique par rapport aux clefs principales, à l'aide des *combados*, à partir des cotés jusqu'à la clef centrale.

- Pose des pierres : lorsque tous les cintres sont en place, on pose les clefs verticales des lignes faîtières. On pose les claveaux des nervures et les voussoirs et on remplit tous les reins simultanément. Entre les appuis, des *combados* en demi-cercle permettent de disposer les voussoirs de manière concentrique et relient les quatre losanges.
- On construit jusqu'aux lignes faîtières secondaires. Sur ces lignes, on place des *combados* pour renforcer une zone fragile de la voûte : les angles des losanges, et l'intersection entre les deux plans engendrés par l'arc (p) et par l'arc (f). Les voussoirs changent de direction et sont incorporés à la nouvelle forme du sommet de la voûte, toujours concentriquement par rapport aux clefs.
- En arrivant au sommet de la voûte, on dispose encore des *combados* en forme de cercle, en reliant tous les voûtains des losanges avec des voussoirs concentriques autour de la clef centrale.

Remarquons que toute la voûte est intercalée par ces grandes clefs à quelques endroits fragiles. Toute la voûte est construite avec des voussoirs concentriques disposés autour des clefs principales, ce qui renforce grandement la rigidité et la résistance aux forces de traction. Et nous en voulons pour preuve sa résistance au grand tremblement de terre de 1755.

Conclusions

La nervure est l'outil de conception et de construction des voûtes nervurées. Sa définition en plan et en élévation crée un squelette qui permet de maîtriser la forme de la voûte. La multiplication des nervures permet de modeler la forme plus facilement. Pour simplifier la construction, la forme des nervures est standardisée, comme le montrent les exemples relevés dans la présente étude.

La première caractéristique des voûtes de João de Castilho, commentée plus haut, est leur forme particulière. Cette forme est déterminée par la forme des lignes faîtières normalement courbes dans les deux axes, parfois horizontales, à l'instar des voûtes espagnoles et anglaises. Dans ses derniers ouvrages, Castilho utilise des voûtes à nervures composées qui lui permettent de modeler la forme, non à partir d'une ligne, mais à partir de figures centrées au sommet de la voûte qui délimitent une surface plate ou courbe. Ainsi João de Castilho parvient à élargir le sommet des voûtes et à créer des voûtes de grande portée.

La ligne faîtière courbe est tracée avec un unique arc de cercle, ce qui est visible à l'œil nu et qui a été confirmé par nos relevés. Cette courbe entretient toujours un rapport avec le plan et dans la plupart des cas, son rayon est égal au double du rayon de l'arc diagonal. Dans les cas plus tardifs, ce rayon correspond à la hauteur de la voûte et il est centré au niveau du sol.

L'arc diagonal est, dans la majorité des cas, un demi-cercle et il constitue l'arc principal qui sert à tailler toutes les nervures, y

compris les liernes. Il existe quelques exceptions de nervures tracées avec un rayon différent, en particulier les formerets. La forme des nervures principales est en anse de panier pour les voûtes surbaissées. Pour atteindre la hauteur préalablement déterminé par la ligne faîtière, Castilho relève ou abaisse les centres des arcs des nervures principales.

Deux méthodes sont utilisées pour atteindre la hauteur souhaitée : translation de l'arc verticalement (méthode la plus courante ailleurs en Europe), ou rotation du grand arc de l'anse de panier autour du centre du petit arc (méthode anglaise). Dans la plupart des cas, le petit arc est le même pour toutes les nervures et il reste au même niveau.

À travers le contrôle de la forme des voûtes, on contrôle la continuité à donner aux surfaces. Toutes les voûtes de Castilho partagent cette caractéristique et l'on exclura la possibilité de lui attribuer les voûtes dont la ligne faîtière est brisée et sans aucun rapport avec le plan, par exemple les voûtes du porche de la cathédrale de Braga, de la nef de Vilar de Frades, et de la chapelle de l'église du couvent São Francisco à Porto.

Nous attribuons à João de Castilho les autres voûtes des cas d'étude abordés ici.

1. Cathédrale de Braga : dans la voûte à *combados* du chœur, les lignes faîtières - transversales et longitudinale - sont identiques et leur rayon est le double du rayon de l'arc diagonal de la petite travée (l'arc principal).

2. Les chœurs des églises du couvent de Setúbal et de Vila do Conde partagent le même tracé : la ligne faîtière longitudinale est courbe et tracée d'un seul arc de cercle sur les deux travées.

3. Dans les églises-halles de la cathédrale de Viseu, de Freixo de Espada-à-Cinta, d'Arronches et de Torre de Moncorvo, comme à la nef de Jerónimos, la ligne faîtière est un arc de cercle qui unifie les trois nefs transversalement. Les hauteurs des clefs centrales sont trouvées en traçant un demi-cercle sur la diagonale.

4. À l'église du monastère de Vilar de Frades, toutes les voûtes sont tracées à partir des deux faîtières en arc de cercle, de rayon valant le double de celui de l'arc diagonal (standard). La voûte du chœur présente une faîtière longitudinale horizontale. Il est intéressant de comparer la voûte à *combados* du bras du transept avec la voûte du couvent de São Francisco, à Porto : malgré la similarité de leurs plans, leurs formes sont différentes à cause justement du tracé de leur ligne faîtière respective. La forme brisée de la voûte à Porto exclut toute hypothèse d'une attribution à João de Castilho.

5. Les monastères de Batalha et d'Alcobaça présentent deux voûtes à liernes à lignes faîtières horizontales. À Batalha, l'objectif est visiblement d'accentuer la continuité dans l'axe longitudinal de la voûte en accompagnant le plan tournant du chœur. Au monastère d'Alcobaça, des liernes horizontaux délimitent un plafond plat hexagonal.

7. La voûte du chœur de l'église de Marvila présente un sommet

surbaissé, comme à Alcobaça, mais sa surface est courbe. Les deux lignes faîtières sont courbes et de même de rayon (valant le double du rayon de l'arc principal, la diagonale) ; le segment supérieur de la diagonale utilise un arc identique, ce qui crée la continuité du sommet.

8. Au couvent du Christ à Tomar, Castilho a surtout utilisé des voûtes à nervures composées. La forme ne dépend ici pas exclusivement de la ligne faîtière principale mais également des lignes faîtières secondaires entre les croisées (un losange aux cloîtres et un carré dans l'antichambre du chapitre). Le sommet de la voûte est surbaissé. Castilho construit des voûtes plates, comme celle du cloître de Santa Barbara, et un berceau à caisson au réfectoire. Seule la voûte de l'église, une des premières à être construite, possède des combados et une forme déterminée par le rayon de la ligne faîtière, qui est égal au double du rayon de l'arc diagonal.

9. Le monastère de Jerónimos présente les exemples les plus complexes de voûtes nervurées : les voûtes de la nef et du transept sont constituées de nervures composées et de *combados*. La voûte à tierceron du premier étage du cloître et les voûtes à liernes des deux chapelles du transept présentent une ligne faîtière de rayon égal au double du rayon de la diagonale en plan (la diagonale est l'arc standard). Dans les autres voûtes, la ligne faîtière a un rapport avec le plan général de la voûte et non avec la travée. Au cloître inférieur et dans le réfectoire, l'arc principal est une anse de panier. Dans la nef et le transept, l'arc principal est un arc de cercle. Leur ligne faîtière est centrée au niveau du sol. Dans l'église de Jerónimos, le rapport entre le plan et l'élévation est le principe qui a été utilisé pour tracer le plan de la voûte et de l'église. Dans la nef, les proportions du plan sont reproduites en élévation. Il est expliqué au chapitre 4 qu'on y retrouve les mêmes figures, des carrés et des rectangles avec des diagonales à 60º, sur toute la largeur et la hauteur de la nef. Un carré est inscrit dans la section transversale de l'église. Ce rapport géométrique entre le plan et l'élévation est appliqué en chantier en utilisant des cordes.

La forme des voûtes de Castilho découle d'une innovation à la fois conceptuelle et constructive. Nous avons vu qu'il existe un rapport étroit entre l'évolution du projet et la construction.

Selon les dessins d'Hernán Ruiz et de Rodrigo Gil de Hontañón, le tracé suit l'ordre de la construction des cintres : 1º) le plan ; 2º) la diagonale ; 3º) la clef centrale ; 4º) la ligne faîtière ; 5º) l'emplacement des clefs sur la ligne faîtière ; 6º) les tiercerons. Dans la voûte de la nef de Jeronimos, où les diagonales sont absentes, la ligne faîtière couvre les trois nefs d'un mur à l'autre et plusieurs clefs sont disposées en dehors de cette ligne, il était donc nécessaire de déterminer les hauteurs des clefs ne se trouvant pas sur la ligne faîtière. Pour cela, sans recourir à des plans en sections de la voûte, les constructeurs pourraient prendre les hauteurs des clefs sur la ligne faîtière, en s'aidant d'une trame tirée du plan.

Nous avons trouvé une hypothèse pour l'évolution du cintrage de la voûte du transept appliquant cette méthode, avec seulement le plan et deux arcs de cercle standard pour la construction des nervures (à part les formerets et les doubleaux).

Pour construire une voûte, il ne fallait pas beaucoup de dessins préalables grâce à la standardisation des nervures et à la méthode de construction consistant à tirer l'élévation à partir du plan et de la faîtière préalablement déterminée (sur le dessin et le plancher). Presque tout est fait en chantier. Il suffisait de connaître la hauteur de la clef centrale, la courbe standard et celle de la Faîtière (données du Projet).

Nous constatons toujours un parallèle entre la conception et la construction et il est difficile de dire ou commence l'un et termine l'autre. Par exemple, l'idée de segmenter les nervures, ou de les composer de plusieurs segments, si elle semble logique au niveau de la construction, ne l'est pas pour le projet en général. Si nous prenons l'exemple de la voûte de la sacristie de Jeronimos, la construction de l'ogive avec un seul arc semble beaucoup plus probable au niveau conceptuel que de tracer deux segments de cercle. Ainsi, nous penchons vers l'hypothèse qu'il y ait eu un tracé du projet d'ensemble et un tracé de construction, celui qui est fait à l'échelle réel en chantier.

CONCLUSIONS

Questions historiques

Deux questions préalables se posaient à nous en commençant cette recherche. La première portait sur l'originalité des églises-halles manuélines, notamment des églises de Freixo de Espada-à-Cinta, d'Arronches et de Jerónimos, en particulier leur voûte unique traversant les trois nefs et la forme en berceau de Jerónimos. La seconde question était de confirmer l'attribution à Castilho, de Jerónimos ainsi que des deux autres églises-halles, en se basant sur leur ressemblance formelle.

Que Castilho soit l'auteur des voûtes de l'église de Jerónimos constituait pour nous une certitude de départ. L'analyse architecturale que nous avons entreprise dans notre mémoire de maîtrise ne laisse subsister aucun doute sur la thèse d'une paternité unique des voûtes de la nef et du transept. La présente étude actualise les questions d'attribution pour Jerónimos et pour d'autres cas d'études, et confirme l'originalité formelle qui découle des innovations conceptuelles et techniques de Castilho.

Attributions

Le parcours de l'architecte João de Castilho (c.1470–c.1552) au Portugal se caractérise par son engagement ininterrompu dans les grands chantiers de son époque. Il a ainsi travaillé pour le roi Dom Manuel, qui a donné son nom au style architectural manuélin, et ensuite pour Dom João III. Des documents indiquent, à partir de 1528, que Dom João III appelle Castilho « maître de mes travaux » (*mestre de minhas obras)*, désignation qui est réutilisée près de vingt ans plus tard en 1545. Castilho a bénéficié d'un contexte économique particulièrement favorable à l'époque, à savoir l'afflux de richesses provenant des grandes découvertes. La monarchie voulait s'affirmer notamment à travers l'architecture. Le Portugal devint alors un creuset d'influences et de culture où venaient travailler de nombreux artistes et artisans étrangers. On notera à cet égard que le Portugal a été un pays pionnier dans la divulgation des traités d'architecture : Vitruve y était connu dès 1488 et il a été traduit avant les autres pays européens entre 1537-41.

Toutes les sources documentaires montrent que João de Castilho avait une capacité de travail remarquable et que son activité fut intense jusqu'à sa mort à Tomar, probablement octogénaire. Il est également permis de penser qu'une partie de son œuvre nous est encore inconnue, comme l'indique une allusion dans la lettre de Dom João III, que nous avons citée, à « certains [ouvrages] par contrat et d'autres sans eux ». Il coordonnait plusieurs équipes en sous-traitance, ce qui lui permettait de voyager et de diriger plusieurs chantiers à la fois comme le faisaient d'autres architectes en Europe.

Les documents de l'époque attestent que João de Castilho a été « maître » des travaux à la cathédrale de Braga (la première voûte à *combados* au Portugal), à l'église de Vila do Conde, aux

monastères de Jerónimos à Lisbonne, d'Alcobaça et de Batalha et au couvent du Christ de Tomar. Un grand nombre d'autres ouvrages sont par ailleurs attribués à Castilho, sur la base de certaines analogies architecturales ou à travers d'autres interprétations. Les conclusions du premier chapitre abordent cette question plus en détail.

Pour Jerónimos, qui a été notre principal objet d'étude, plusieurs documents d'époque contemporains indiquent que Castilho était le responsable des travaux pour la totalité du monastère, bien qu'il soit admis que Boitaca (maître d'œuvre avant Castilho) avait établi un plan d'ensemble initial. On a parfois attribué le projet des voûtes à Boitaca en se basant sur des chroniques qui sont toutefois postérieures.

Les dossiers des travaux font état que Castilho fut maître d'œuvre entre 1517 et 1519 pour le cloître, le chapitre, la sacristie et le portail latéral, et qu'il travaillait avec des artisans en sous-traitance : Pero Goterres dirigeait les travaux du chapitre ; Rodrigo Pontezilhas la porte du chapitre ; Fernando de la Fermosa la sacristie ; Francisco de Benavente le cloître ; Leonardo Vaz le réfectoire ; Rodrigo Afonso les trois chapelles du narthex. Deux sculpteurs dirigeaient des équipes : Pero de Trillo à la porte principale et Nicolau de Chanterenne à la grande porte occidentale. Castilho serait logiquement l'auteur et le constructeur des voûtes, Boitaca s'étant chargé du plan initial et de la construction des murs.

Un document relatif aux travaux du monastère d'Alcobaça mentionne que Castilho s'était rendu à Jerónimos en 1519, précisément l'année dans laquelle on dressait les piliers de la nef. En 1522 une lettre du roi Dom João III demande de payer partiellement « João de Castyllo, maître d'œuvre de Bellem » pour « faire de nouveau » les voûtes et les piliers du transept. La voûte de la nef a probablement été construite entre 1519 et 1522, sauf la dernière travée contiguë au transept. Aucun document disponible ne fait mention de Castilho entre 1522 et 1525. Mais il est indubitablement resté sur place pour ériger les piliers du transept, pour terminer la voûte de la nef et pour construire la voûte du transept. On imagine en effet difficilement qu'il ait pu être ailleurs, vu la complexité et la portée de l'ouvrage à couvrir. On sait au demeurant qu'il disposait alors d'une maison à Belém.

Quand on sait ce que représentait la charge de *maître* à l'époque, on ne peut qu'attribuer les voûtes de Jerónimos à Castilho. Le maître cumulait le rôle d'architecte, d'entrepreneur, d'administrateur et de superviseur du chantier, *a fortiori* quand on était le Maître du roi ou quand il s'agissait de grands ouvrages, ce qui était le cas ici. L'architecte ne communiquait pas toutes ses informations au constructeur par des plans à l'échelle, méthode moderne. Les dessins – plans, élévations, sections - étaient plus rares et servaient en premier lieu à présenter le concept dans ses grandes lignes au commanditaire et à tous les participants au processus de construction. Ensuite, pour l'exécution de détail, le maître traçait le plus souvent des plans à l'échelle réelle en début des travaux, dans la salle des traits, d'où il supervisait l'exécution des premiers patrons qui serviraient à confectionner les cintres et à tailler les pierres.

Ensuite seulement, il pouvait déléguer des travaux à des sous-traitants. Cette méthode de travail semble être celle qui a été utilisée à Jerónimos, comme le confirme la longue liste d'ouvriers qui travaillaient avec João de Castilho.

La propre architecture témoigne de cette évidence. Deux détails indiquent que les murs étaient construits avant de tracer le plan des voûtes, ce qui laisse entendre qu'il y a eu deux phases de construction distinctes, celle de Boitaca et celle de Castilho : a) les contreforts des murs de la nef ne sont pas alignés avec les colonnes, et les fenêtres des deux premières travées ont été refermées lors de la construction du narthex ; et b) les murs du transept présentent deux consoles intérieures qui n'ont aucun rapport structurel avec la voûte.

Par contre, la voûte de la nef est clairement contemporaine à celle du transept. Toutes deux sont des voûtes à nervures composées, avec des étoiles identiques en plan. Ce type de voûte est caractéristique de Castilho - nous l'avons constaté en observant les voûtes manuélines de notre inventaire - et Castilho les a même représentées sur le grand portail sud de l'église, un peu comme s'il s'agissait de sa « marque de fabrique », sa signature. À l'intérieur, les deux voûtes présentent des traits communs : en plan, le carré de la nef est remplacé par un demi-cercle dans la dernière travée centrale parfaire le raccord avec le demi-cercle de la voûte du transept ; en élévation, les deux voûtes sont délimitées par des nervures aux formes coïncidentes et leurs surfaces se prolongent. Elles présentent également des similitudes dans leurs détails constructifs : les nervures naissent à des niveaux différents, elles pénètrent dans la maçonnerie et les clefs sont cylindriques. Le tracé des lignes faîtières suit le même principe géométrique et suit un arc de cercle qui est centré au niveau du sol. Pour la construction, Castilho a adopté un principe de standardisation des nervures reposant sur l'arc principal et sur l'arc de la ligne faîtière. En plan, le profil des colonnes jouxtant le transept correspond au profil du faisceau de quatre colonnes de la nef qui s'interpénètrent.

Ainsi, tout porte à conclure une seule et même chose : les deux voûtes de l'église (celle de la nef et celle du transept), ainsi que les autres voûtes du monastère, sont un projet de João de Castilho.

Mais la plus grande entreprise de Castilho fut le couvent du Christ à Tomar. Il avait commencé ce chantier - qui fut celui de sa vie - avant même celui de Jerónimos. Son nom figure sur le portail sud daté de 1515. Il est architecte du roi Dom Manuel I pour l'église. Plus tard, pour le roi suivant, Dom João III, il entreprend la deuxième phase de travaux qui dura jusqu'à 1548. En somme, la quasi-totalité du couvent de Christ est l'œuvre de Castilho.

Certains documents descriptifs de la deuxième phase de travaux confirment son rang d'architecte - et non seulement celui d'entrepreneur comme certains auteurs l'ont suggéré. Il a établi des dessins pour le concours d'idées (qu'il a remporté) et ensuite les dessins de chantier. Un descriptif des travaux du cloître principal fait état de tracés d'arcs et numérote la manière « dont ils bougent ». Ces voûtes étaient appelées « croisée à la romaine ». Dans le cadre de la présente étude, elles sont décrites comme des voûtes à nervures composées en croisée.

C'est au couvent du Christ que Castilho exploite les possibilités des voûtes à nervures composées. Les cloîtres sont couverts de croisées à tiercerons. La librairie présente des voûtes à croisée d'ogives et à liernes. L'antichambre du chapitre est voûtée par quatre croisées d'ogives. Ce système lui permettait de composer des formes Renaissance en berceau et de couvrir de grandes espaces avec des croisées d'ogives. C'est ainsi qu'il a construit la voûte du transept de l'église de Jerónimos, à six croisées.

Le terme de voûte *à nervures composées* découle du besoin que nous avons éprouvé de créer une typologie des voûtes basée sur le type de nervure. Une telle typologie permet en effet de comparer les différentes voûtes et surtout de comprendre le rôle des nervures par type.

Notre classement est le suivant :

- voûtes d'ogives (nervures entre les appuis et la clef centrale) : les ogives prennent des formes croisées ou radiales.

- voûtes à tiercerons (nervures entre les appuis et les clefs secondaires) : un seul tierceron part de chaque appui, ou deux (ou plus) dans les formes en étoile.

- voûtes à liernes (nervures entre les clefs) : les liernes forment également des étoiles ou des figures au centre de la voûte.

- voûtes à *combados* (liernes courbes en plan) : les *combados*, liernes courbes, forment également des figures au sommet de la voûte.

- voûtes à nervures composées (ogives, tiercerons ou liernes, constitués de plusieurs segments) : les nervures composées peuvent recevoir une forme simple en croisées ou des formes plus complexes, figurées ou réticulées.

L'analyse des voûtes manuélines nous amène à conclure que tous ces types de voûtes ont été utilisés à l'époque manuéline. Les types les plus représentés sont les voûtes à tiercerons, suivies des voûtes à liernes et à *combados* et finalement les voûtes à nervures composées, ces dernières étant surtout attribuées à Castilho. Les *combados* n'ont été utilisés que pendant la période manuéline, ni avant ni par la suite. En élévation, les voûtes manuélines sont principalement constituées d'ogives en demi-cercle et accessoirement d'arcs brisés. Environ un tiers des voûtes sont surbaissées et présentent des nervures en anse de panier. Les lignes faîtières sont soit horizontales soit courbes.

João de Castilho a lui aussi utilisé tous ces types de voûtes mais, et de manière prépondérante, surtout les voûtes à *combados*, suivies des voûtes à liernes et à nervures composées, dont la plupart lui sont attribuées. Les voûtes de Castilho et les autres voûtes manuélines se différencient principalement par la forme courbe de leurs lignes faîtières, qui est particulièrement bien définie dans son cas. Sa courbe est tracée avec un seul arc de cercle et elle n'est donc jamais brisée. Dans les voûtes du chœur, une seule courbe traverse deux travées. Cette particularité, qui est particulièrement frappante dans le cas de la voûte de la nef de Jerónimos, est une constante chez Castilho, et elle a été confirmée par nos relevés dans les cas d'étude.

Des voûtes analysées ici, nous lui en attribuons plusieurs, par type :

- Voûtes en ogives : les églises-halles de la cathédrale de Viseu et de Freixo de Espada-à-Cinta, le cloître du monastère d'Alcobaça, les voûtes surbaissées du couvent du Christ à Tomar.

- Voûtes à tiercerons : église de Moncorvo, chœur de l'église d'Areias, cloître supérieur de Jerónimos, chapelle droite du chœur de Vila do Conde, chapelles de l'église de Marvila, voûtes surbaissées du cloître du couvent de Jésus à Setúbal et du couvent du Christ ;

- Voûtes à liernes : vestibule du monastère de Batalha, narthex de l'église de Moncorvo, réfectoire du monastère de Jerónimos, Misericórdia d'Arronches et chœur de l'église d'Atalaia (des formes en étoile) ; chœur et croisée du monastère de Vilar de Frades et église de Moncorvo (figures à quatre côtés) ; accès à la sacristie du monastère d'Alcobaça (en hexagone) ; les deux chapelles du transept et le cloître inférieur de Jerónimos (en octogone) ;

- Voûtes à *combados* : chœur de la cathédrale de Braga, chœur de l'église de Jésus à Setúbal, narthex de la cathédrale de Viseu , chœurs et chapelles de l'église de Vila do Conde, chapelles du transept de Vilar de Frades , chœur de Misericórdia à Freixo de Espada-à-Cinta, église du couvent de Christ de Tomar, sacristie et narthex de Jerónimos, chœur de Freixo de Espada-à-Cinta, nef de la chapelle de Santo Cristo (des figures diverses, surtout en forme de cercle et des quadrilobes en accolade).

- Voûtes à nervures composées : nef, transept, narthex et cloître inférieur de Jerónimos ; cloîtres, librairie, accès au chapitre et autres accès au couvent du Christ, église Santa Maria do Olival à Tomar.

Originalité et influences

La présente étude confirme l'originalité des églises-halles attribuées à João de Castilho, plus particulièrement la nef de l'église de Jerónimos. Parmi toutes les formes de voûtes analysées en Europe, nous n'en avons pas trouvé d'équivalente, qui unifie ainsi trois nefs d'un seul trait et avec une surface courbe continue.

Bien que l'idée initiale de la présente étude fût de vérifier l'attribution à Castilho des trois églises-halles de Jerónimos, de Freixo de-Espada-à-Cinta et d'Arronches, nos recherches au Portugal ont permis de trouver d'autres exemples de voûtes qui complètent ce trio : les nefs de l'église du couvent de Jésus de Setúbal, de la cathédrale de Viseu et de l'église de Torre de Moncorvo.

Nous croyons pouvoir reconnaître une évolution conceptuelle chez Castilho dans la quête de la forme en berceau et de la continuité de l'espace. L'église de Jésus de Setúbal possède des nefs qui culminent à la même hauteur que la voûte du chœur et elle présente une continuité longitudinale. Transversalement, cette unité est interrompue par les murs préexistants qui séparent la nef centrale en croisée d'ogives des nefs latérales en demi-berceau. À la cathédrale de Viseu, une ligne faîtière figurant une corde à nœuds relie les clefs centrales des trois nefs en suggérant la continuité dans l'axe

transversal, bien qu'elle soit encore légèrement brisée : ceci constituerait la première expérience de Castilho. Dans les églises de Freixo de Espada-à-Cinta, Moncorvo et Arronches, la courbe transversale est tracée d'un seul arc. La forme de la voûte est continue et ces voûtes ne diffèrent qu'en plan. Freixo est en croisée d'ogives, Moncorvo possède des voûtes à tiercerons dans les bas-côtés et des voûtes à liernes dans la nef centrale. Dans ces deux dernières églises, les nefs sont divisées par des doubleaux. Toutefois, à Arronches, l'unité spatiale est plus claire, effet obtenu en éliminant les arcs longitudinaux. Au monastère de Jerónimos, l'unité spatiale atteint à la perfection : les trois nefs sont recouvertes par une « unique voûte en berceau » composée d'un réseau de nervures agencées en forme de triangles qui se contrebutent et qui remplacent les traditionnels arcs doubleaux et formerets. La surface du sommet de la voûte est continue et élargie par des liernes, tant dans l'axe transversal que longitudinal.

Nous avons identifié d'autres églises-halles au Portugal. Quelques-unes sont contemporaines de Castilho et d'autres lui sont postérieures. Aucune autre cependant ne présente cette forme courbe ni cet objectif délibéré d'unification des nefs. Ce principe n'est appliqué que dans les églises qui sont de près ou de loin associées au nom de João de Castilho.

On retrouve encore la même forme courbe unifiant les travées longitudinalement dans les voûtes de chœur auxquelles on a pu associer le nom de Castilho. La ligne faîtière est alors un seul arc de cercle qui traverse deux travées longitudinalement, dans les chœurs des églises de Jésus de Setúbal, de Vila do Conde, d'Atalaia et de Caminha.

L'approche comparative que nous avons adoptée permet de mettre en évidence le caractère particulier des voûtes portugaises du début du 16ème siècle, et en particulier celles de João de Castilho. Ailleurs en Europe, même en l'absence de nervures longitudinales séparant la nef et les bas-côtés ou lorsque la voûte est à nervures composées, la forme de la voûte reste brisée entre les travées, c'est-à-dire que la surface composée par les voûtains ne présente jamais une courbure unique et continue sur l'ensemble de l'espace. La forme brisée des voûtes provient des méthodes de tracé et de construction employées.

En Allemagne et en Europe centrale, les nervures tracées à partir d'un arc principal (diagonal ou tierceron) sont par conséquent fonction de la forme et de la hauteur de celui-ci. Cette méthode ne permet pas d'intervenir sur la forme de la ligne faîtière, principalement à travers plusieurs travées. L'analyse des dessins gothiques conservés et des manuscrits révèle deux méthodes : on traçait les nervures, de courbe standardisée en arc de cercle, soit à partir du haut, la hauteur étant déterminée par le *Prinzipalbogen,* soit à partir du bas, jusqu'arriver à la clef centrale. La hauteur est contrôlée dans le premier cas, mais pas dans le second. Cependant, des études récentes ont découvert des voûtes dont les nervures ont des rayons différents. Notons que l'unification de l'espace de ces églises-halles doit beaucoup à la lumière qui traverse les grandes fenêtres et à la plasticité et à la forme organique des nervures qui se

détachent des supports et qui se prolongent vers les murs et les piliers, conférant à l'espace un ample mouvement et une grande continuité. Ce n'est pas le cas des églises-halles portugaises, qui sont plus sombres. Si la forme en berceau limite la dimension des baies, la continuité des formes des voûtes permet cependant à la lumière de se diffuser de manière ininterrompue à travers la surface de la voûte.

Il existe toutefois deux églises, en Allemagne et en République tchèque, dont les voûtes créent une surface élargie au sommet entre les piliers. La forme de la voûte présente ainsi une certaine continuité entre les travées. Il s'agit de la voûte à nervures composées de l'église d'Hirschfeld, datant de 1582, et de la voûte à nervures courbes de Benedikt Ried à l'église de Laun, construite vers 1520-1534, soit peu après la nef de Jerónimos. Le plan de cette dernière ressemble beaucoup à celui de Jerónimos. On observe, aux lignes d'intersection des surfaces de la voûte, un carré entre les piliers et un octogone dans la nef centrale, malgré l'absence de nervures sur une partie des figures. À Hirschfeld, la voûte est constituée d'un réseau de nervures composées.

En Angleterre, le tracé dénote une volonté de créer une continuité entre les travées longitudinalement, en utilisant une *ridge line* horizontale. Pour éviter la forme de reins brisés produite par la méthode traditionnelle française qui consistait à élever ou à abaisser l'arc pour atteindre la hauteur désirée, les nervures étaient à deux centres. La naissance de ces arcs composés restait à un même niveau sur l'imposte, avec un petit arc identique pour toutes les nervures. Pour atteindre la hauteur désirée, on élève ou on abaisse l'arc principal par deux moyens : soit on trace le grand arc avec des rayons différents, en fonction de la longueur de la nervure, soit on conserve le même rayon et on fait pivoter le grand arc autour du centre du petit arc. Cette dernière méthode a été utilisée par Castilho dans certains cas, notamment à Jerónimos (réfectoire, cloître inférieure, chapelle nord du transept).

La voûte de la nef de Jerónimos présente en effet des similitudes avec les *fans vaults* anglaises : les reins sur les colonnes s'apparentent aux conoïdes et les octogones rappellent les *central spandrels*. Cependant nos relevés montrent que, à Jerónimos, les reins ne sont pas formés par un seul arc qui pivote autour d'un axe vertical. De plus, les voussoirs et les nervures sont deux éléments distincts.

En Espagne, les nervures étaient tracées à partir de la ligne faîtière, mais le goût pour les formes courbes et en coupole, caractéristiques de la Renaissance, a peut-être contribué à ce que les travées des églises-halles constituent des unités distinctes, et que leurs voûtes ne présentent pas de continuité. La grande majorité des voûtes espagnoles à l'étude ont les lignes faîtières courbes dans leurs deux axes. Il existe deux documents très importants pour notre propos concernant le tracé et la construction d'une voûte à tierceron. Hernán Ruiz *el Joven* (1545-1566) trace l'arc diagonal en demi-cercle et les autres nervures de rayons distincts et il prend la hauteur de toutes les clefs sur la ligne faîtière. Dans le texte où Rodrigo Gil de Hontañón explique la construction d'une voûte à tierceron, les hauteurs des clefs sont elles aussi prises à l'aide de fils à plomb disposés sur la

ligne faîtière. Dans les deux cas, les faîtières sont prédéterminées et courbes. Celle de Ruiz a un rayon qui vaut le double de celui de l'arc diagonal, tandis que le rayon de la faîtière de Rodrigo Gil est identique au rayon de la diagonale ; sa voûte est par conséquent une coupole.

L'architecture de Juan de Alava fait figure d'exception, Au lieu d'utiliser des lignes faîtières courbes, il réalise l'unification des travées en utilisant le surbaissement des arcs, des lignes faîtières longitudinales horizontales et des *combados* qui se prolongent d'une travée à l'autre. Le surbaissement et la continuité des *combados* entre les travées sont proches de Castilho. Par contre les voûtes de Juan Guas, à qui on attribue souvent des influences sur Castilho, ne sont pas similaires dans leur tracé et ses lignes faîtières sont souvent brisées.

Chez Castilho, nous retrouvons surtout des influences de Simón de Colonia, fils de Juan de Colonia, avec qui Castilho a étudié à Burgos et à Séville. Il associe les deux systèmes de voûtes, allemand et espagnol : il organise le tracé à partir de la ligne faîtière, comme en Espagne et il utilise des *combados* et des nervures composées, caractéristiques des voûtes allemandes. Ses *combados* sont habituellement des quadrilobes en accolade, comme ceux qu'utilise João de Castilho. Dans les voûtes des deux chapelles des cathédrales de Salamanque et de Séville, Colonia utilise des nervures composées sur un plan à quatre étoiles, qui ressemblent à la voûte à six étoiles du transept de Jerónimos. Les détails qu'il utilise au croisement des nervures au niveau des tas de charge sont discrètement repris par Castilho. Castilho a donc très probablement été influencé par Simón de Colonia.

Les voûtes à nervures composées dénotent l'influence de l'Europe centrale et de l'Allemagne. Elles sont documentées dans le carnet du maître WG. De plus, on les retrouve dans la croisée de Notre-Dame de Trèves, dans la sacristie et la Wenzelskapelle de la cathédrale de Prague, dans l'église paroissiale de Kolberg en Autriche, et dans l'église de Braniewo en Pologne. En Allemagne, la voûte du réfectoire de Neuzelle présente un plan unique et l'ogive principale traverse trois travées.

En Espagne, outre les deux exemples de Simón de Colonia, ce type de voûte est présent dans la croisée de l'hôpital de los Reyes Católicos à Saint Jacques de Compostelle, dans la Lonja de Valence (où João de Castilho a peut-être travaillé), dans l'église San Tomás d'Ávila, et dans l'église de Santoña, dans la région d'origine de Castilho.

Ces voûtes ont un plan qui n'est pas sans rappeler celui du transept de Jerónimos, où Castilho a créé un plan composé de six carrés et de six étoiles. Pourtant, elles diffèrent dans leur structure. Les croisées à Jerónimos ne sont pas constituées de nervures secondaires mais de six croisées d'ogives composées. Nous n'avons pas trouvé, ni au Portugal ni ailleurs, une voûte similaire en forme et dimensions (28,80m x 19,00m).

Nous avons réalisé un large panorama des voûtes d'Europe pour comprendre l'originalité des voûtes manuélines et les influences que João de Castilho a peut-être subies. Parmi les 731 voûtes que nous avons étudiées, nous n'en avons pas trouvé qui ait une forme comparable. Ceci n'exclut évidemment pas qu'il puisse y en avoir ailleurs que nous n'avons pas visitées ou trouvées dans la littérature. Nous avons présenté les données recueillies sous forme de tableau – chaque voûte y est classée en détail par typologie de nervures – ce qui permettra de poursuivre ultérieurement les études. Nous envisageons d'élargir le nombre de cas d'étude et d'analyser d'autres pays d'Europe, par exemple les anciens Pays-Bas situés au carrefour entre la France, l'Allemagne occidentale et l'Angleterre, pour comprendre les diverses typologies et les particularités de chaque pays, ainsi que les rapports entre eux.

Sur base de nos résultats pour les voûtes portugaises, certaines recherches devraient être menées, que nous considérons importantes.

Il faut approfondir la connaissance de l'architecture des architectes qui sont parfois confondus avec Castilho. Nous pensons en particulier à Diogo Boitaca, dans les cas de Jerónimos et de Setúbal, et à Diogo Castilho, son frère, dans le cas du monastère de Santa Cruz de Coimbra. Certains documents conservés aux archives nationales de Torre do Tombo évoquent la participation de João de Castilho au monastère de Santa Cruz. Ils mériteraient d'être étudiés par les historiens de l'art. Les études architecturales sont inexistantes. Nous n'avons pas relevé les voûtes de ce monastère, mais tant la voûte de la chapelle São João das Donas comme celle du narthex de l'église du monastère de Coimbra nous semblent présenter beaucoup de similitudes avec l'architecture de João de Castilho, notamment la continuité de la ligne faîtière arrondie et de la surface de la voûte. Ce n'est pas le cas par exemple, de la voûte de la chapelle de Carneiros du couvent de São Francisco, à Porto, qui est attribuée à Diogo de Castilho.

Il y aurait également lieu d'approfondir les études sur les ouvriers qui ont participé aux ouvrages de Castilho, notamment les « appareilleurs » de Jerónimos, afin de mieux comprendre les influences des étrangers qui ont pu s'y trouver.

Plusieurs voûtes non attribuées nous semblent être de Castilho. Nous pensons en particulier à certaines voûtes à *combados* et à nervures composées, qu'on retrouve dans les régions d'Évora et de Portalegre, dans les couvents de Lóios, à Évora et à Arraiolos, au couvent Flor da Rosa et à la cathédrale d'Évora. Nous savons qu'en 1533, Castilho est resté six mois à Evora pour préparer des plans du couvent du Christ à Tomar. En tant qu'architecte du roi, on peut penser qu'il aura aussi fait d'autres projets dans cette région, dont la bibliographie ne parle pas. Notre méthode d'analyse permettrait ainsi non seulement de trancher les questions d'attribution mais également d'élargir le recensement des œuvres connues de l'architecte.

Questions structurelles et constructives

L'architecte João de Castilho est parvenu à associer deux systèmes de nervures – nervures composées et *combados* – pour créer des formes nouvelles et construire des voûtes de grande portée, comme celles de l'église de Jerónimos de Belém. La voûte de la nef est constituée de liernes composés permettant d'élargir son sommet. La voûte du transept est formée d'ogives composées permettant d'élargir sa portée. En associant des *combados,* disposés de manière précise, Castilho a introduit une innovation à la fois constructive et structurelle.

Les détails constructifs, obtenus par des sondages, montrent que les *combados* sont pourvus d'un queutage plus saillant que les nervures droites en plan et qu'ils sont, à ce titre, structurellement plus proches des voussoirs que des nervures.

Les nervures droites sont les éléments principaux, qui relient les supports entre eux et qui confèrent à la voûte sa forme première. Les *combados* sont des nervures secondaires utilisées pour renforcer les zones d'intersection des plans de voûte et pour disposer les voussoirs de manière à renforcer la stabilité de la maçonnerie de la voûte. Les voussoirs sont disposés de manière concentrique.

Dans la nef, la forme est créée par des tiercerons et des liernes qui se contrebutent. Les *combados* délimitent la surface en berceau et les coupoles de plan octogonal et carré. Leur forme concave ou convexe redistribue les efforts vers les supports, comme les arcs sur la baie d'un mur en maçonnerie.

Dans le transept, la forme est produite par les doubleaux et par deux croisées d'ogive principales et six croisées d'ogives secondaires. Les contreforts sont alignés dans l'axe des ogives principales, ce qui découle du même principe structurel que les croisées d'ogives. Les *combados* sont disposés en cercle dans l'axe des lignes faîtières des six croisées et de la faîtière principale. Encore une fois, ces endroits correspondent aux zones d'intersection de la surface de la voûte. Les *combados* permettent de disposer les voussoirs concentriquement sur toute la voûte. Les cercles renforcent ces zones les plus fragiles, ils font chaînage dans la maçonnerie et contiennent les poussées horizontales comme les parpaings d'un mur.

La maçonnerie qui remplit les reins, distribue les efforts verticalement aux colonnes et de manière continue aux murs.

Les nervures sont intégrées dans la maçonnerie et, d'après les documents de la restauration des années 1927-1930, elles présentent des crampons en fer à l'extrados. Nous pensons que ces crampons sont d'origine parce que la maçonnerie qui recouvre la voûte semble elle aussi être d'origine. Le mortier est à base de chaux aérienne de proportion 1 :1, qui est un mortier à prise lente, idéal pour permettre à la voûte de se déformer lentement lors du décintrage.

La fonction constructive et structurelle des nervures est principalement assurée par l'intégration de celles-ci dans la maçonnerie. En effet, on voit que Castilho a interrompu par des décors les doubleaux et les ogives principales. Si la partie visible et saillante des nervures ne descend pas jusqu'au tas de charge, l'important semble être leur queutage qui est à l'intérieur de la

maçonnerie. Ceci contrarie les calculs de dimensionnement des nervures proposés à l'époque, notamment par Lorenz Lechler et Rodrigo Gil de Hontañón. Comment dès lors interpréter l'interruption des nervures principales du transept au niveau des reins ?

Les résultats de l'étude de stabilité des voûtes de la nef de Jerónimos et du cloître hospitalier du couvent du Christ à Tomar montrent que le queutage des nervures influence le comportement structurel des voûtes selon que celles-là sont – ou non – intégrées dans la maçonnerie. Les deux voûtes ont une forme en berceau. Cependant, malgré sa forme, la voûte de Jerónimos, à nervures à queutage présente le comportement d'une église à trois nefs. La voûte du cloître hospitalier du couvent de Christ de Tomar, dont les nervures sont sur le même plan que la voûte, a le comportement d'un berceau. À Jerónimos, les efforts en traction et en compression sont localisés au niveau des nervures. À Tomar, les nervures ont peu d'influence sur la structure.

Considérant les limites de la méthode d'analyse par les éléments finis, que nous avons utilisée, nous avons aussi étudié les déformations verticales et horizontales en nous basant sur notre relevé. Ceci nous a permis de comparer les résultats, lesquels se sont avérés identiques en ce qui concerne le comportement structurel des voûtes.

Nous avons aussi considéré les principes géométriques utilisés à l'époque de Castilho pour dimensionner les éléments structurels.

Les voûtes des églises-halles mentionnées (cathédrale de Viseu, matrices de Freixo de Espada-à-Cinta, de Moncorvo, d'Arronches et l'église de Jerónimos) suivent un tracé d'élévation commun et traditionnel, malgré les différences dans leurs plans. La hauteur de leurs clefs centrales correspond à celle d'un demi-cercle tracé sur la diagonale.

L'arc de cercle de la ligne faîtière est tracé à partir de ces trois points. À Viseu et à Jerónimos, le centre de ce grand arc est au niveau du sol et son rayon correspond à la moitié de la diagonale du plan. Nos hypothèses de tracé pour ces églises-halles confirment leur ressemblance formelle et conceptuelle. Avant Jerónimos, Castilho avait expérimenté la forme en berceau pour tester la stabilité.

À l'église du monastère de Jerónimos, l'épaisseur des murs et celle des fines colonnes de la nef respectent la proportion 1/10 par rapport à la portée, comme le recommande Lorenz Lechler. L'épaisseur des tiercerons de la nef correspond à 1/28 de la portée, comme indiqué par Rodrigo Gil de Hontañón. Nous n'avons pas obtenu des résultats satisfaisants pour le dimensionnement des nervures du transept, une structure qui est plus complexe.

Des études plus spécialisées pourraient répondre à cette question, et à d'autres, en ce qui concerne le rôle structurel des nervures. Nous pensons à des études sur la structure, mais surtout à des études sur la construction des voûtes à nervures, sujet actuellement peu développé. Nos analyses se basent surtout sur l'interprétation du système constructif à travers des données de sondages et grâce au travail sur place, ce qui nous a notamment permis d'observer

l'extrados des voûtes. À Freixo de Espada-à-Cinta le même détail de nervures courbes à queue saillante est visible à l'extrados. En Allemagne, pays d'origine des nervures courbes, on retrouve des exemples de nervures courbes intégrées dans la maçonnerie à l'extrados des voûtes. Le recours au sondage est important pour comprendre la constitution interne des structures. Nous nous penchons davantage sur les études des détails constructifs que sur les études structurelles par des méthodes d'éléments finis. Notons que la discussion sur la valeur structurelle des nervures reste toujours ouverte. Par contre, l'analyse structurelle à partir des moyens disponibles à l'époque, développée par Santiago Huerta, est selon nous le chemin à suivre, puisque cela nous permet de comprendre le raisonnement de l'époque, les limitations et aussi les moyens d'innovation.

Questions architecturales – Le tracé et la construction

L'idée de tracer un seul arc sur trois nefs et de construire une voûte en berceau est l'innovation architecturale la plus remarquable de João de Castilho. Nos analyses démontrent que cette ligne détermine la hauteur de toutes les clefs de la voûte. L'innovation réside dans la forme, qui découle d'une innovation conceptuelle, au niveau soit de la méthode de tracé, soit de la méthode de construction.

Castilho a poussé au plus loin le rôle constructif et structurel des nervures pour créer des formes qu'aucun autre architecte n'a osé de construire. Jerónimos constitue ainsi à la fois une innovation dans le domaine architectural, constructif et structurel.

La question de la création de la forme était de notre point de vue la plus importante. Nous avons exposé ces objectifs dans l'introduction. Le tracé de la nef de Jerónimos, et notamment l'élévation des nervures, présentait encore des points à éclaircir, mis à part les trois clefs principales. Comment Castilho détermine-t-il la hauteur des clefs qui ne se trouvent pas sur l'axe de la voûte de la nef ? A-t-il recouru à des méthodes de projet utilisant des sections, une méthode avancée pour l'époque ? Quelle autre méthode a lui pu permettre de construire la forme de la nef, ainsi que celle du transept qui est encore plus complexe ? L'analyse de plusieurs cas d'étude nous a aidés à comprendre ces méthodes.

La principale caractéristique de João de Castilho, quant à ses voûtes, est qu'il définit au préalable les lignes faîtières ou les figures au sommet de la voûte, lesquelles déterminent la hauteur des clefs. Dans les voûtes d'ogives et à tiercerons, la ligne faîtière est courbe (cas le plus courant) ou horizontale. Dans les voûtes à liernes ou à nervures composées, les figures centrales délimitent des surfaces plates ou courbes. Dans les voûtes à nervures composées, la figure centrale correspond aux lignes faîtières secondaires qui relient les croisées de la voûte. C'est ainsi que João de Castilho parvient à élargir le sommet des voûtes et à créer des voûtes de grande portée.

L'utilisation d'arcs identiques est une autre constante des voûtes de Castilho. Toutes les nervures sont standardisées. Ce principe

constructif constaté ailleurs depuis le 13ème siècle est devenu courant partout en Europe au 16ème siècle et facilitait la construction de voûtes plus complexes.

Pour construire ses voûtes, même celles de la nef et du transept de Jerónimos, à l'exception des doubleaux et des formerets, Castilho a utilisé seulement un ou deux arcs de cercle. Il lui suffisait pour cela de connaître l'arc principal et l'arc de la ligne faîtière, qui sont les deux arcs standardisés.

Dans la majorité des cas, l'arc principal est l'arc diagonal en demi-cercle et il constitue l'arc standard utilisé pour tailler toutes les nervures, y compris les liernes. Il existe des exceptions de nervures tracées avec un rayon différent, en particulier les formerets.

Le plus souvent, le rayon de la ligne faîtière vaut le double de celui de l'arc principal, et il est donc équivalent à la longueur de la diagonale en plan.

Castilho utilise l'arc en anse de panier surtout dans ses derniers ouvrages à Jerónimos et à Tomar. Cet arc, qui est également standard, est réutilisé pour toutes les nervures. Souvent, la longueur du rayon du plus grand arc vaut la moitié de la diagonale en plan.

La hauteur des nervures est conditionnée par la ligne faîtière ou par la figure au sommet de la voûte, laquelle détermine la forme. Pour atteindre la hauteur des clefs, la méthode consiste à relever ou à abaisser le centre des arcs de cercle. Pour des arcs en anse de panier, la méthode anglaise est le plus couramment utilisée : le centre du petit arc reste au même niveau et celui du grand arc pivote autour du centre du petit arc, lequel est identique pour toutes les nervures, ce qui simplifie la taille et construction du tas de charge.

L'arc des lignes faîtières est lui aussi standardisé. Dans les voûtes plates ou surbaissées, le plafond est réalisé avec des arcs identiques à celui de la ligne faîtière. Même l'ogive est segmentée et constituée de deux arcs : l'arc principal et celui de la ligne faîtière. On retrouve de telles voûtes à la chapelle du transept de Vilar de Frades, au chœur de Marvila, dans le passage vers le chapitre à Tomar, et à Jerónimos dans l'aile nord du cloître et dans le transept.

Cette solution, qui consiste à segmenter la nervure en deux arcs (ou plus), est peut-être une des raisons qui explique l'existence des nervures composées. La nervure segmentée permet en effet de modeler plus facilement la forme et de travailler avec plusieurs arcs standardisés. Pour construire une nervure composée, on peut recourir à des arcs différents ou à des arcs identiques, selon les besoins. À Jerónimos, les ogives composées du transept sont constituées de deux arcs distincts, et les ogives de la sacristie de deux arcs identiques. Notons qu'une ligne faîtière horizontale est elle aussi constituée de plusieurs segments de nervures courbes. Le principe est le même.

L'étude des méthodes de tracé et de construction en Europe nous a permis de reconstituer le cheminement conceptuel de Castilho et d'émettre des hypothèses de tracé et de construction pour les voûtes ici relevées, en nous basant sur des principes en usage à l'époque.

Il fallait tracer l'élévation des nervures, non à partir de la section

orthogonale comme on le ferait aujourd'hui, puisque ce type de représentation est développé surtout en Italie à l'époque, sur les grands chantiers de Sangallo, comme celui de Saint-Pierre de Rome. Nous sommes par contre partis des principes courants à l'époque sur les grands chantiers du gothique tardif, c'est-à-dire nous avons dérivé les mesures du plan pour tracer l'élévation. Les hypothèses de tracé suivent ainsi les indications d'Hernán Ruiz

Hernán Ruiz trace la voûte de la manière suivante : 1º tracer l'arc diagonal en demi-cercle ; 2º à partir de la clef centrale, tracer la ligne faîtière de rayon égal à la longueur de la diagonale en plan (rapport trouvé dans plusieurs voûtes de nos cas d'étude) ; 3º sur la ligne faîtière, déterminer l'emplacement des clefs ; 4º tracer les nervures en prenant leur hauteur sur la ligne faîtière et leur distance du point d'appui en plan. Cette méthode est valable pour tous nos cas d'étude. La différence est que Castilho utilise des arcs standardisés et tangents à l'extrados (comme dans les exemples allemands), ce qui produit des surfaces moins brisées.

Les hypothèses de construction suivent en outre la méthode indiquée par Rodrigo Gil de Hontañón concernant le cintrage : 1º placer le cintre de la diagonale ; 2º à l'aide d'un fil à plomb vers le plan, placer l'étai de la clef centrale ; 3º à partir de ce point, placer la cerce de la ligne faîtière (de forme prédéterminée) jusqu'aux formerets ; 4º à partir des cintres, positionner le fil à plomb vers les clefs tracées sur la plateforme de travail pour obtenir la hauteur de l'étai à installer.

Les méthodes de Hernán Ruiz et de Rodrigo Gil s'appliquent aux voûtes dont les clefs sont situées sur les lignes faîtières et les diagonales, ce qui est le cas de la plupart des voûtes en étoile ou à liernes. Pour les voûtes plus complexes, comme celles de l'église de Jerónimos, il faudra trouver un moyen de définir la hauteur des clefs qui ne se trouvent pas directement sur les lignes faîtières.

Notons que la progression du tracé d'Hernán Ruiz correspond à celle de Rodrigo Gil de Hontañón pour ses constructions. Après avoir établi les diverses hypothèses pour nos cas d'études, nous avons compris qu'il est possible de trouver la hauteur des clefs en cours de construction avec très peu de dessins. La méthode consiste en effet à placer des cintres dans un certain ordre, de manière à ce que la hauteur des clefs soit progressivement mesurée à partir des cintres sans devoir recourir aux plans.

Pour la construction de la voûte de la nef, il suffisait de connaître l'arc de la ligne faîtière et l'arc principal qui sert pour toutes les nervures. Si nous traçons le plan des clefs et la trame du plan sur la plateforme de travail, on trouve les hauteurs des autres clefs qui ne sont pas sur l'axe à l'aide d'un fil à plomb pendant entre la faîtière et la trame. On prend les hauteurs des clefs et on dispose les étais correspondants. On dispose les cintres des tiercerons entre les étais et les tas de charge et ensuite les cintres des liernes. La forme est obtenue ainsi.

Pour le transept, le cintrage commence par les arcs doubleaux et par la ligne faîtière longitudinale. À partir de là, avec à peine deux courbes standardisées, il est possible de construire les autres cintres : on dispose les cintres des ogives, ainsi que ceux des lignes faîtières

secondaires des six croisées d'ogives qui forment le rectangle horizontal au sommet de la voûte. Ensuite, les tiercerons et les liernes sont mis en place. Le rectangle délimite le niveau où les nervures composées changent de rayon, en commençant par le rayon de l'arc principal et en poursuivant avec l'arc de la ligne faîtière longitudinale. L'arc principal sert à tracer toutes les nervures entre le tas de charge et le rectangle. L'arc de la ligne faîtière sert à tracer les nervures qui sont limitées par le rectangle, celles du sommet.

Une fois que la voûte est mise en forme par cintrage des nervures droites en plan, la construction de la voûte peut commencer. On place les clefs principales et ensuite les claveaux, les voussoirs et les *combados* (ils font partie des voûtains), à partir de tous les reins - remplis simultanément – jusqu'au sommet, de manière à ce que la maçonnerie soit stable. Beaucoup de grands voussoirs d'une pièce sont posés directement d'une nervure à l'autre, notamment les parties surbaissées des octogones de la nef. À la fin on recouvre toute la voûte avec une fine couche de maçonnerie. Il faut ensuite attendre quelques jours ou parfois des semaines pour que les mortiers sèchent et durcissent, avant de décintrer.

Nous ne savons pas si Castilho connaissait des méthodes de projection et de tracé plus avancées pour l'époque, mais la méthode de création de la forme par le procédé constructif, appliqué à nos cas d'études, notamment à Jerónimos, prouvent que la forme peut être obtenue avec très peu de dessins, même pour des voûtes plus complexes. Ceci implique également que le dessin de section à projection orthogonale – qui suppose d'ailleurs dans ces cas-ci une connaissance avancée de la géométrie descriptive – n'est pas nécessaire à la réalisation, contrairement à ce que l'on pourrait penser. Il reste évidemment encore à déterminer comment Castilho communiquait la forme exacte des voussoirs et des claveaux à ses tailleurs, démarche qui, elle, nécessite en principe la connaissance de l' « art du trait » - ou stéréotomie - tellement vanté par Philibert de l'Orme pour le contexte français du milieu du siècle, et par les Vandelvira, par exemple, pour l'Espagne de la fin du siècle. Malheureusement, les sources manquent à cet égard.

Ces résultats contribuent à nos connaissances sur l'architecture de João de Castilho, et, plus largement, sur la problématique de la création de la forme et de la construction des voûtes à nervures.

Nos analyses nous ont amenés à nous interroger sur le rôle du maître d'œuvre sur le chantier. Il nous semble que les voûtes plus complexes exigeaient la présence du maître sur le chantier, tant pour tracer les plans à l'échelle réelle que pour le cintrage, afin de déterminer correctement les hauteurs de toutes les clefs et la forme finale de la voûte. Nous savons en effet que Castilho était très présent en chantier car sa présence est avérée par des documents.

Mais pour certaines des voûtes que nous avons analysées, nous croyons qu'un constructeur expérimenté a pu assumer ces responsabilités en l'absence de Castilho. C'est ainsi que nous justifions des différences parfois minimes dans certaines voûtes, qui semblent similaires en plan, mais ne sont pas en élévation. La différence entre les deux voûtes du cloître inférieur de Jerónimos, suggèrent que la voûte sud a été exécutée par un sous-traitant et que

la voûte nord l'a été par Castilho. Les différences dans les détails du tas de charge sont clairement visibles à l'œil nu et les clefs de l'octogone sont à des hauteurs différentes (données du relevé). La voûte nord montre une méthode de tracé et de construction qui part de l'octogone, dont les clefs sont toutes à la même hauteur et qui commande la position des nervures. Au sud, la hauteur des clefs résulte du positionnement des nervures.

Les deux voûtes des chapelles du transept de Jerónimos sont également identiques en plan mais pas en élévation : elles présentent entre elles beaucoup plus de différences que celles du cloître, et on les distingue à l'œil nu. Au nord, l'octogone est nivelé et produit une forme cupulaire, les clefs déterminent la hauteur des diagonales et des tiercerons, comme pour la voûte nord du cloître. Au sud, les clefs de l'octogone sont placées en fonction de la forme des nervures, comme dans la voûte sud du cloître.

Les deux voûtes nord ont été tracées et construites en fonction de la hauteur déterminée par l'octogone central. La construction des deux voûtes sud a dépendu de la forme de la ligne faîtière et de l'arc principal. Les quatre voûtes présentent des nervures standardisées, mais dans les voûtes nord, les cintres s'abaissent pour aboutir à la hauteur désirée, et les cintres des voûtes sud restent au même niveau ou sont déplacés par translation verticale.

Il y a évidemment encore des avancées à accomplir dans la recherche des méthodes de tracé et de construction de l'époque.

Concernant les méthodes de construction, il existe très peu d'ouvrages bibliographiques sur le sujet et encore moins de sources originales, ce qui ajoute encore à la difficulté. Vu la manque d'informations, une voie selon nous très importante à suivre et qui apporte beaucoup de données est celle de la reproduction de maquettes, telle que mise en pratique actuellement par le Professeur Jose Palacios et Enrique Rabasa Díaz à l'Université Polytechnique de Madrid, David Wendland à l'Université Technique de Dresden, Giuseppe Fallacara et Luc Tamborero à l'université polytechnique de Bari. Nous-mêmes à notre université de Lisbonne ISCTE-IUL avons lancé l'expérience en 2012. Lors de la réalisation de la maquette de la sacristie de Jerónimos – un de nos cas d'études – nous avons eu la preuve que de telles expériences donnent de précieux résultats.

Il serait important de construire d'autres maquettes en adoptant la méthode de construction que nous avons utilisée (celle de Rodrigo Gil de Hontañón) et de simuler des modèles de voûtes construites avec et sans nervures courbes (les *combados*) afin de comparer les résultats, notamment en ce qui concerne la stabilité des voûtes.

En ce qui concerne le tracé, d'une part, il y a lieu d'analyser les plans qui existent dans les traités et les archives (démarche essentielle) ; d'autre part, il faut effectuer des relevés et analyser les résultats. Pour l'interprétation des relevés, nous recommandons de considérer les méthodes de tracé de l'époque plutôt que la rigueur même du relevé aux normes actuelles. Les bâtiments ont probablement subi des déformations ; il n'est donc jamais possible d'attendre un résultat très précis. Notre expérience suggère que

même lorsque des arcs semblent différents dans les relevés, la standardisation peut apparaître si l'on applique des méthodes de tracé gothique. Pour cette raison, nos données de relevé sont reprises en annexe, afin de permettre aux futurs chercheurs d'en disposer et d'en tirer éventuellement d'autres interprétations.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie sur le Portugal

1. ALBUQUERQUE, Luís da Silva Mousinho de, *Memória Inédita Àcerca do Edifício Monumental da Batalha*, Leiria, Typ. Leiriense, 1854.
2. ALMEIDA, Alberto Pereira de, *Porto Monumental*, Porto,s.n / s.d.
3. ALMEIDA, Carlos Alberto Ferreira de, "Geografia da Arquitectura Românica", in *História da Arte em Portugal,* vol. 3, Publicações Alfa, Lisboa, 1986.
4. ALMEIDA, Carlos Alberto Ferreira de, *História da Arte em Portugal. O Românico*, Lisboa, Presença, 2001.
5. ALMEIDA, Carlos Alberto Ferreira de, *Arquitectura Românica de Entre-Douro-e-Minho*, Tese de Doutoramento, Porto, 1978.
6. ALMEIRIM, Zarco de, *A Catedral bracarense: visita de estudo artístico*, Lubango, Joaquim Fernandes dos Santos, 1931.
7. ALVES, Alexandre, *Artistas e Artífices nas Dioceses de Lamego e Viseu*, Vol. II, Viseu, Governo Civil de Viseu, 2001.
8. ALVES, Alexandre, "A Catedral de Viseu", in *Monumentos*, Lisboa, Setembro de 2000.
9. ALVES, Alexandre, *A Sé Catedral de Santa Maria de Viseu*, Viseu, Câmara Municipal de Viseu"; Santa Casa da Misericórdia; Grupo de Amigos do Museu de Grão Vasco, 1995.
10. ALVES, Alexandre, 'Artistas espanhóis na cidade de Viseu nos séculos XVI e XVII', in *As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos Descobrimentos*, Livraria Minerva, Coimbra, 1987.
11. ALVES, Alexandre, 'Artistas e artífices nas Dioceses de Lamego e Viseu', in *Revista da Beira Alta*, Viseu, 1983.
12. ALVES, Alexandre, 'A actividade de Gaspar Ferreira em terras do interior Beirão', in *Mundo da Arte*, N.º 6, Coimbra, Maio de 1982.
13. ALVES, Alexandre, *O frontispício e as torres da Catedral de Viseu*, Tipografia Beira Alta, Viseu, 1971.
14. ALVES, Alexandre, 'Elementos para um inventário artístico da cidade de Viseu', in *Revista Beira Alta*, Viseu, Vol. XX, 1961.
15. ALVES, Ana Maria, *As Entradas Régias Portuguesas: uma visão de conjunto*, Lisboa, Livros Horizonte, 1986.
16. ALVES, Ana Maria, *Iconologia do poder real no período Manuelino: à procura de uma linguagem perdida*, Lisboa, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, 1985.
17. ALVES, Francisco Manuel, *Memórias Arqueológico-Históricas do Distrito de Bragança*, 11 vols., Bragança, Câmara Municipal de Bragança, 1990.
18. ALVES, Joaquim Ferreira e MARINHO; Natália, *A Igreja Matriz de Torre de Moncorvo - Documentos para a história da sua "Fábrica" (1747 / 1800)*, s.n., 1979.

19. ALVES, José da Felicidade, *O Mosteiro dos Jerónimos*, Livros Horizonte, Lisboa, 3 Vols, 1989.
20. ALVES, Natália Marinho Ferreira, 'De arquitecto a entalhador. Itinerário de um artista nos séculos XVII e XVIII', in *Actas do I Congresso Internacional do Barroco*, Vol. I, Porto, 1991.
21. *Anais do Município de Tomar*, 8 vols., Câmara Municipal de Tomar, Tomar, 1941 / 1972.
22. APPLETON, Vasco Miguel Pontes, *Abadia de Santa Maria de Alcobaça: caracterização construtiva*, tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2000.
23. ARAÚJO, Norberto de, *Peregrinações em Lisboa*, livro IX, Vega, Lisboa, 1993.
24. ARAÚJO, Norberto de, *Inventário de Lisboa*, Câmara Municipal de Lisboa, Lisboa, 1944.
25. ARAÚJO, Renata, *Lisboa: a Cidade e o Espectáculo na Época dos Descobrimentos*, Livros Horizonte, Lisboa, 1990.
26. Arquivo do Cabido da Sé de Viseu (ACSV), *Livro para nele se assentarem os assentos e determinaçoins do Reverendo Cabbido para que fosse mais verdadeiro*, 1708-1778.
27. ARRUDA, Ana Margarida, *Património Monumental de Santarém: inventário, estudos descritivos*, Câmara Municipal de Santarém, Santarém, 1996.
28. ATANÁZIO, M. C. Mendes, 'O Restauro dos monumentos depois da Revolução Francesa e de Viollet-Le-Duc', in *Lusíada, Revista de Ciência e Cultura*, Universidade Lusíada, Série de História, nº 2 – Abril/1992, Edição Especial: 208-21, Lisboa, 1992.
29. ATANÁZIO, M. C. Mendes, 'O Barroco e a Cultura Religiosa', separata de: *I Congresso Internacional do Barroco: Actas*, Reitoria da Universidade do Porto, Governo Civil do Porto, Porto, 1991, p.151-157
30. ATANÁZIO, M. C. Mendes, 'Contributo de João de Castilho para o espaço e estrutura da arquitectura do manuelino, As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos descobrimentos', in, *II Simpósio Luso-Espanhol de História da Arte*, Ed. Minerva, pp. 259-275, Coimbra, 1987.
31. ATANÁZIO, M. C. Mendes, *A Arte do Manuelino, Mecenas, Influências, Espaços*, Editorial Presença, Lisboa, 1984.
32. ATANÁZIO, Manuel C. Mendes, *A Arquitectura do Manuelino-Novos Problemas de Espaço e Técnica*, *Caderno n° 1*, éd. de l'auteur, Moçamedes, 1969.
33. ATANÁZIO, Manuel C. Mendes, *Arte moderna e arte da Igreja: Critérios para julgar e normas de construção*, Ministério das Obras Públicas, Centro de Estudos de Urbanismo, Coimbra, 1959.
34. AZEVEDO, Ana Maria; BROWN, Reginald Albert, *Portugal e as novas fronteiras quinhentistas*, Imprensa Nacional - Casa da Moeda, Lisboa, 2000.
35. AZEVEDO, Carlos A. Moreira, *Catedral do Porto*, Cabido Portucalense, Porto, 2001.
36. AZEVEDO, Correia de, *Arte Monumental Portuguesa*, Vol. IV, s.n., Porto, 1975.
37. BAIÃO, António, 'A Vila e o Concelho de Ferreira do Zêzere', in *O Archeologo Português*, Vol. 14 e 22, 1909 e 1917.
38. BAPTISTA PEREIRA, Fernando António; SILVA, Carlos Tavares da, *Convento de Jesus, 500 anos de Arqueologia e História*, Câmara

Municipal de Setúbal, Setúbal, 1989.
39. BARBOSA, Ignácio de Vilhena, *Monumentos de Portugal: Históricos, Artísticos e Archeologicos*, Castro Irmão, Lisboa, 1886.
40. BARBOSA, Ignácio de Vilhena, "As Belas Artes em Portugal", in *O Panorama*, Vol. 12, 1855.
41. BARBOSA, Ignácio de Vilhena, *As Cidades as Villas da Monarchia Portugueza que teem brasão d'armas*, Vol. 1, Typ. do Panorama, Lisboa, 1860.
42. BARREIRA, João, 'Batalha', in *Grande Enciclopédia Portuguesa e Brasileira*, vol. 4, s.d.
43. BARREIRA, João, "O classicismo de João de Castilho", in Sep. da *Revista da Faculdade de Letras*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1934.
44. BARREIRA, João, "O goticismo de João de Castilho", in Sep. da *Revista da Faculdade de Letras*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1933.
45. BARREIRA, João, "Santarém" in *Guia de Portugal*, Vol. II, Lisboa, 1927.
46. BARREIRA, João, *Arte Portuguesa*, Edições Excelsior, Lisboa, 1946.
47. BARREIROS, Manuel de Aguiar, *A Catedral de Santa Maria de Braga: estudos criticos archeologico-artísticos*, Marques Abreu, Porto, 1922.
48. BARREIROS, Manuel de Aguiar, *A Egreja de Villar de Frades no concelho de Barcelos*, s.n., Porto, 1919.
49. BARREIROS, Manuel de Aguiar, *A Portada românica de Vilar de Frades e o seu simbolismo*, Marques Abreu, Porto, 1920.
50. BASTO, Carlos, *Nova Monografia do Porto*, Companhia Portuguesa Editora, Porto, 1938.
51. BEIRÃO, António da Motta, "Sé de Viseu: uma legenda, um erro, uma abóbada", in *Beira Alta*, Vol. 3, fasc. 4, Viseu, 1944, pp. 338-342.
52. BELLINO, Albano, *Archeologia Christã*, Empreza da História de Portugal, Lisboa, 1900.
53. *Boletim da DGEMN, Igreja de Arronches*, Nº 101, Setembro 1960.
54. *Boletim da DGEMN, Sé de Viseu*, N.º 122, Dezembro de 1965.
55. BORGES, Inês da Conceição do Carmo, *A Igreja de Nossa Senhora da Conceição em Tomar*, Texto policopiado, (Seminário :"Arquitectura e Renascimento") Mestrado em História da Arte da FLUC, Coimbra, 2006.
56. CÂNCIO, Francisco, *Ribatejo Histórico e Monumental*, Vol. I, Instituto Português de Arqueologia, Lisboa, 1938.
57. CEBALLOS, Alfonso Rodriguez, "Juano Moreno y la Arquitectura Protobarroca en Salamanca", in *Archivo Español de Arte*, Vol. XLIX, Nº 195, Madrid, 1977.
58. CERQUEIRA, Cruz, *O Arquitecto da Batalha era Inglês e Viveu em Viana do Castelo?*, Tip. Gutenberg, Viana do Castelo, 1945.
59. CHICÓ, Mário Tavares, "Arquitectura em Portugal na época de D. Manuel e nos princípios do reinado de D. João III" in *História da Arte em Portugal*, Vol. II, Portucalense, Porto, 1948.
60. CHICÓ, Mário Tavares, *A Arquitectura Gótica em Portugal*, Livros Horizonte, Lisboa, 2005.
61. CHICÓ, Mário Tavares, *Arquitectura da Idade Média em Portugal: dois estudos acerca da Igreja do Mosteiro da Batalha*, Instituto para a

Alta Cultura, Lisboa, 1944.
62. CHICÓ, Mário Tavares, *Remarques sur le choeur de l'église de Sainte-Marie-de-la-victoire: Batalha*, Institut Français au Portugal, Lisboa, 1940.
63. CHRISTINO DA SILVA, João Ribeiro, "Arte na Renascença", in *Elementos de História da Arte*, Biblioteca de Instrução Profissional, Lisboa, S/D. Vol. III, pp.127-131.
64. COCHERIL, Dom Maur, *Alcobaça: Abadia Cisterciense de Portugal*, Lisboa, Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1989.
65. COCHERIL, Dom Maur, *Notes sur l'Architecture et le Décor dans les Abbayes Cisterciennes du Portugal*, Paris, Fundação Calouste Gulbenkian, Centro Cultural Português, 1972.
66. COCHERIL, Dom Maur, *Routier des Abbayes Cisterciennes du Portugal*, Paris, Fundação Calouste Gulbenkian, Centro Cultural Português, 1978.
67. COELHO, Maria da Conceição Pires, 'Contributo de João de Castilho para a génese da arquitectura do Renascimento em Portugal', in *As relações artísticas entre Portugal e Espanha,* Livraria Minerva, Coimbra, 1987, Livraria Minerva, Coimbra, 1987.
68. COELHO, Maria da Conceição Pires, *A Igreja da Conceição e o Claustro de D. João III do Convento de Cristo em Tomar: influências do Renascimento italiano na arquitectura portuguesa do século XVI*, Santarém, Assembleia Distrital, 1987.
69. CÓMEZ, Rafael, *Los constructores de la España medieval*, Universidad de Sevilla, 2009.
70. CONDE, Manuel Sílvio Alves, *Tomar Medieval: O espaço e os homens (séculos XIV-XV),* texto policopiado, tese de mestrado em História Medieval, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1988.
71. CORDEIRO, Padre Lourenço Feijó, *Descrição de Freixo de Espada-à-Cinta*, 1758.
72. CORREIA, Alberto, *Viseu*, Presença, Lisboa, 1989.
73. CORREIA, Vergílio, "A Arte: Ciclo Manuelino", in *Historia de Portugal*, (Dirigida por Damião Peres),Vol. IV, Portucalense, Barcelos, 1932.
74. CORREIA, Vergílio, *As Obras de Santa Maria de Belém de 1514 a 1519*, Tip. do Anuário Comercial, Lisboa, 1922.
75. CORREIA, Vergílio, *Batalha: Estudo Histórico-Artístico-Arqueológico do Mosteiro da Batalha*, Litografia Nacional, Porto, 1929.
76. COSTA, Avelino Jesus da, *O Bispo D. Pedro e a organização da Diocese de Braga*, Imprensa da Universidade, Coimbra, 1959.
77. COSTA, Fr. Bernardo da, *História da Militar Ordem de Nosso Senhor Jesus Christo*, Officina de Pedro Ginioux, Tomo II, 1775.
78. COSTA, Luís, *A Sé de Braga: algumas breves noticias sobre a Catedral de Santa Maria*, APPACDM, Braga, 1998.
79. COSTA, Magalhães, "Obras no Museu da Sé prolongam-se até à Páscoa", in *Jornal de Notícias*, 7 Dezembro 2006, p. 30.
80. COSTA, Marisa, "A Construção da Igreja Matriz de Vila do Conde", Vila do Conde, *Boletim Cultural da Câmara Municipal de Vila do Conde*, Nova Série, Nº 13, Junho 1994, pp. 32 – 54.
81. COUTINHO, B. Xavier, *Nótulas para a História da Sé do Porto*, Fernando Machado, Porto, 1965;
82. CRAVEIRO, Maria de Lurdes, *Diogo de Castilho e a arquitectura da Renascença em Coimbra*, (Texto policopiado), Tese de Mestrado da

Faculdade de Letras de Coimbra, Coimbra, 1990.
83. CRUZ, Manuel Braga de, "A Sé de Braga", in *Bracara Augusta*, Nº30, Braga, 1976.
84. CUSTÓDIO, Jorge, *Candidatura de Santarém a Património Mundial*, Câmara Municipal de Santarém, 1996.
85. DGEMN, *Igreja de Freixo de Espada à Cinta*, Boletim Nº 70, Lisboa, Dezembro 1952.
86. DGEMN, *Sé Catedral do Porto*, Boletim N.º 40 a 43, Jun. / Set. / Dez., 1945, Mar. 1946.
87. DGEMN/DREMN, *Processo Administrativo da Sé do Porto*, Expediente Nº25, (1921 a 1923), P.1 a P.6 (Anos 1927-2001)
88. DIAS, Pedro, 'A Arquitectura do ciclo Batalhino', in *História da Arte em Portugal*, Vol. 4, Publicações Alfa, Lisboa, 1986.
89. DIAS, Pedro, 'A igreja do convento de Jesus de Setúbal na evolução da arquitectura manuelina', in Sep. *Belas Artes*, 1978, pp.63-72.
90. DIAS, Pedro, 'Arquitectura Mudéjar Portuguesa: tentativa de sistematização', in *Mare Liberum*, Nº 8, Dezembro de 1994.
91. DIAS, Pedro, 'João de Castilho e o desenvolvimento da arquitectura manuelina', in *História da Arte em Portugal*, Publicações Alfa, Lisboa, 1986.
92. DIAS, Pedro, "O aparecimento de um novo estilo decorativo: o manuelino', in *A Arquitectura de Coimbra na transição do gótico para a Renascença (1490-1540)*, Epartur, Edições Portuguesas de Arte e Turismo Coimbra, 1982. pp. 355-483.
93. DIAS, Pedro, 'O Manuelino', in *História da Arte em Portugal*, Vol. 5, Publicações Alfa, Lisboa, 1986.
94. DIAS, Pedro, *A Arquitectura de Coimbra na transição do gótico para a Renascença (1490-1540)*, Epartur, Edições Portuguesas de Arte e Turismo, Coimbra, 1982.
95. DIAS, Pedro, *A Arquitectura Gótica Portuguesa*, Editorial Estampa, Lisboa, 1994.
96. DIAS, Pedro, *A arquitectura manuelina*, Civilização, Porto, 1988.
97. DIAS, Pedro, *Os Portais Manuelinos do Mosteiro dos Jerónimos*, Instituto de História da Arte, Coimbra, 1993.
98. *Dicionário Geográfico de Portugal* (Memórias Paroquiais de 1758), vol. 43, m. 515.
99. DIEULAFOY, Marcel, *Art in Spain and Portugal*, William Heinemann, London, 1913.
100. DONY, Paul, *Batalha: un problème d'influences*, Instituto da Alta Cultura, Lisboa, 1957.
101. DSID: Processo de Obras da Sé do Porto, 1854, 1855 e 1856.
102. FEIO, A. Areosa, *Santarém: princesa das nossas vilas*, J.Cardoso da Silva, Lisboa, 1929.
103. FEIO, Alberto, 'Um arquitecto da românica Sé de Braga', in *Minia*, Braga, Nº1, 1944 - 1946, pp. 209 – 211.
104. FERNANDES, Maria, 'Intervenções da Direcção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais', in *Monumentos*, N.º13, Setembro de 2000, pp. 102-109.
105. FERNANDES, Samuel Roda, *Relatório da Inspecção Visual do Claustro da Sé de Viseu*, Évora, 1995.
106. FERNANDES, Samuel Roda, *Sé de Viseu. Considerações sobre os seus materiais, técnicas construtivas e a sua transformação*, Évora, 1995.
107. FERREIRA, Carlos Alberto de Abreu, *Torre de Moncorvo: percursos e materialidades medievais e modernos*, (Texto policopiado), tese de mestrado em arqueologia, Faculdade de Letras, Universidade Porto, 1998.

108. FERREIRA, Monsenhor José Augusto, 'A Matriz de Vila do Conde', in *Ilustração Moderna*, ano I, Nº 7, Porto, 1926.
109. FERREIRA, Monsenhor José Augusto, 'Vila do Conde. Notas Históricas', in *O Arqueólogo Português*, Vol. XI, Lisboa, 1906.
110. FERREIRA, Monsenhor José Augusto, *Porto: origens históricas e seus principais monumentos*, Marques Abreu, Porto, 1928.
111. FERREIRA, Monsenhor José Augusto, *Vila do Conde e o seu Alfoz: origens e monumentos*, Marques Abreu, Porto, 1923.
112. FIGUEIRA, Luis Manuel Mota dos Santos, *Aspectos Tecnológicos na Decoração da Arquitectura Manuelina*, (texto policopiado), tese de mestrado em História da Arte, Universidade de Lisboa, 1994.
113. FIGUEIRA, Luís Manuel Mota dos Santos, *Técnicas de Construção na Arquitectura Manuelina*, (texto policopiado) Tese de doutoramento, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, 2001.
114. FIGUEIREDO E SILVA, Eugénio Sobreiro de, 'Convento de Cristo nos fins do séc. XIX e nos princípios do séc. XX', Separata *Anais da União dos Amigos dos Monumentos da Ordem de Cristo*, Vol. III, 1958.
115. FIGUEIRINHAS, Laura E. Eschbach, *Proposta de Preservação: conservação, restauro e manutenção da Sé Catedral de Santa Maria de Viseu*, s.l., 1996.
116. FONSECA, Teotónio da, *O Concelho de Barcelos Aquém e Além Cávado*, Vol. II, Santa Casa da Misericórdia de Barcelos, Câmara Municipal de Barcelos, 1987.
117. FRANCO, Luiz Farinha; MONTEIRO, Ana Isabel Líbano, *Jerónimos: Memórias de Cinco Séculos, 1501- 2001*, IPPAR, Lisboa, 2001.
118. FREITAS, Eduardo; CALADO, Maria; FERREIRA, Vítor Matias, *Lisboa: Freguesia de Belém*, Lisboa, 1993
119. FREITAS, Eugenio Cunha e, 'João de Castilho e a sua obra no Além Douro', in *Colóquio*, Nº 15, Lisboa, 1962.
120. FREITAS, Eugénio Cunha e, *Os mestres biscainhos na Matriz de Vila do Conde*, Academia Portuguesa da História, Lisboa, 1961.
121. FREITAS, Eugénio Cunha e, 'Artistas de Braga na Matriz de Vila do Conde (século XVI)', *Bracara Augusta*, Vol. V, Nº 1 a 3, Braga, 1954.
122. GENIN, Soraya, MOREIRA, Rafael y De JONGE, Krista, 'As igrejas-salão portuguesas. A inovação de João de Castillo', in ALONSO RUIZ, Begoña (Ed.), *La arquitectura Tardogótica castellana entre Europa y América*. Madrid, Editorial Silex, 2011, pp. 543-553.
123. GENIN, Soraya, DE JONGE, Krista, 'Concepção e construção de abóbadas nervuradas análise geométrica e formal', in *Actas del VI Congresso Nacional de Historia de la Construcción*, Instituto Juan de Herrera, pp. 881-890, 21 a 24 de Outubro de 2009. Universidad Politecnica de Valencia, 2009.
124. GENIN, Soraya, DE JONGE, Krista, PALACIOS, José, 'Portuguese Vaulting Systems at the Dawn of the Early Modern Period. Between Tradition and Innovation', in *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, pp. 671-678, Cottbus, Katholieke Universiteit Leuven, 20-24 Mai 2009.
125. GENIN, Soraya, DE JONGE, Krista, VAN BALEN, Koenraad, 'Projecto de Conservação das Abóbadas do Claustro da Hospedaria do Convento de Cristo, em Tomar', in *Actas do 4º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estrutura*s, (publicação digital), Universidade de Aveiro, 2008.
126. GENIN, Soraya, DE JONGE, Krista, MOREIRA, Rafael, 'Antiga Mazagão. El Jadida (a Nova)', in *Revista Pedra & CAL*, nº 36, Gecorpa,

2007, pp. 19-21,
127. GENIN, Soraya, PALACIOS, José, 'Les voûtes de João de Castillo au Portugal', in *Actas del Quinto Congresso Nacional de Historia de la construcción*, (Burgos, 2007), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2007, pp. 389-400.
128. GENIN, Soraya, 'Projecto de consolidação do tecto da igreja do mosteiro dos Jerónimos – Estudos preliminares', in *3ºEncore – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*, LNEC, 2003, pp. 653-671.
129. GENIN, Soraya, 'The Nave Vault of the Church of the Hyeronimites Monastery in Lisbon', in *Historical Constructions – Possibilities of numerical and experimental techniques*, Paulo B. Lourenço e Pere Roca, Universidade do Minho, 2001, pp. 293-302,
130. GIL, Júlio, *As Mais Belas Igrejas de Portugal*, 4 Vols., Verbo, Lisboa, 1989.
131. GOMES, Saúl António, *O Mosteiro de Santa Maria da Vitória no séc. XV*, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1990.
132. GORDALINA, Maria do Rosário, 'As Obras Revivalistas do Século XIX, no Mosteiro de Santa Maria de Belém', in *Romantismo, da Mentalidade à Criação Artística*, Instituto de Sintra, Sintra, 1986, pp. 247 – 291.
133. GRILO, Maria J. Bonina, *História da Arte Clássica Medieval (Textos de Apoio)*, Universidade Lusíada, 1989.
134. *Guia de Portugal: Beira Litoral, Beira Baixa e Beira Alta*, [pref. Raúl Proença], Vol. III, Lisboa, Biblioteca Nacional, 1944.
135. GUILLAUME, Jean, 'Demeures d'Éternité: Églises et Chapelles funéraires aux XVe et XVIe siècles', in *Actes du colloque tenu à Tours du 11 au 14 juin 1996*, Picard, 2005.
136. GUIMARÃES, Vieira, *A Ordem de Christo*, Empreza da História de Portugal, Lisboa, 1901.
137. GUIMARÃES, Vieira, *O Claustro de D. João III em Thomar*, Pátria, Gaia, 1931.
138. GUIMARÃES, Vieira, *O poema de pedra de João de Castilho em Thomar*, Lisboa, Oficinas Fernandes, 1934.
139. GUSMÃO, Artur de, *A Real Abadia de Alcobaça: estudo histórico-arqueológico*, Ulisseia, Lisboa, 1948.
140. HAUPT, Albrecht, *A Arquitectura do Renascimento em Portugal, Do tempo de D. Manuel, o Venturoso, até ao fim do domínio espanhol*, Editorial Presença, Lisboa, 1986.
141. HOAG, John D. Los Rodrigo Gil de Hontñon, *Gotico y Renacimiento en la Arquitectura española del siglo XVI*, Xarait Ediciones, Madrid, 1985.
142. JANA, Ernesto, *O Convento de Cristo e as Obras Durante o Período Filipino*, Tese de Mestrado (texto policopiado), Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, 1991.
143. JOAQUIM, Manuel, 'Notícia de vários documentos dos séculos XIII, XIV, XV e XVI, existentes no Museu Grão Vasco', in Separata da *Revista Beira Alta*, Viseu, 1965.
144. KEIL, Luís, *Inventário Artístico de Portugal - Distrito de Portalegre*, Academia Nacional de Belas Artes, Lisboa, 1943.
145. KORRODI, Ernesto, *Alcobaça: estudo histórico-archeológico e artístico da Rela Abadia de Santa Maria de Alcobaça*, Litografia Nacional, Porto 1929.

146. KUBLER, George, *Portuguese Plain Architecture - 1521-1706, between spices and diamonds*, Wesleyan University Press, Middletown, 1972.
147. KUBLER, George; SORIA, Martín, 'Plateresque and Purist Styles, 1480-1650', in *Art and Architecture of Spain and Portugal and their American Dominions, 1500-1800*, Penguin Books, Harmondswarth, 1959, pp. 1-21.
148. KUBLER, George; SORIA, Martín, 'Portugal and Brazil, Manueline and Purist Styles (1500-1800)', in *Art and Architecture of Spain and Portugal and their American Dominions, 1500-1800*, Penguin Books, Harmondswarth, 1959, pp. 101-119.
149. KUBLER, George; SORIA, Martín, *Art and Architecture in Spain and Portugal - 1500 to 1800*, Penguin Books, Harmondswarth, 1959.
150. LACERDA, Aarão de, *História da Arte em Portugal*, Vol. 2, Portucalense Editora, Porto, 1942.
151. LAMBERT, Élie, 'Remarques sur le Plan des Églises Abbatiales de Tomar et Batalha', in *Congresso do Mundo Português*, vol. 2, Lisboa, 1940.
152. LANÇA, Pedro Daniel Neto, *Análise estrutural de abóbadas polinervadas: aplicação ao coro alto do mosteiro dos Jerónimos*, (texto policopiado), tese de mestrado, Universidade de Minho, 2006.
153. LEAL, Augusto Soares d'Azevedo Barbosa de Pinho, *Portugal Antigo e Moderno: Diccionário Geographico, Estatístico, Chorographico, Heraldico, archeologico…,* Vol. XII, Mattos Moreira, Lisboa, 1890.
154. LEITE, Ana Cristina; PEREIRA, Paulo, "Iconologia e imaginário do Mosteiro de Santa Maria de Belém : o maravilhoso do sincretismo cristão-cabalístico e cristão-alquímico", in *História*, Lisboa, Nº 87 (Janeiro 1986), pp. 5-25. (ISSN 0870-4538.)
155. LOURENÇO, Paulo B. ; KRAKOWIAK, Konrad J., 'Estabilidade das abóbadas da igreja do mosteiro dos Jerónimos', in *Métodos Computacionais de Engenharia*, APMTAC, Lisboa, 2004.
156. LOURENÇO, Paulo B.; KRAKOWIAK, Konrad J., 'Safety Assessment of the Jerónimos Church in Lisbon', 2004, http://hdl.handle.net/1822/3186.
157. LOZOYA, Marquês de, *Historia del Arte Hispánico*, Vol. 2, Salvat, Barcelona, 1934.
158. LUCENA E VALE, Alexandre de, 'A Catedral de Viseu', in Separata da *Revista Beira Alta*, Viseu, 1945.
159. LUNA, Manuel Fortea, *La iglesia de la Magdalena de Olivenza - modelo del gótico portugués*, (texto policopiado), tese de doutoramento, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, 2001.
160. MACHADO, Ana Soares; LEITE, Luís; FINO, Saúl, 'O claustro renascentista da Sé de Viseu: proporção, linguagem, significado', in *Monumentos*, n.º 13, Lisboa, Setembro de 2000, pp. 20-25.
161. MACHADO, J. T. Montalvão, 'No II Centenário da Diocese de Bragança e Miranda', in *Brigantia*, Vol. I, Nº3, Bragança, 1981, pp.107-116.
162. MARÇAL, H., *O Bairro da Sé do Porto*, Porto, 1963.
163. MARIA, D. Nicolau de Santa, *Chronica da Ordem dos Conegos Regrantes do Pathriarca Santo Agostinho*, Lisboa, Officina de Joam da Costa, 1668.
164. MARQUES, Lina M. Oliveira, 'O Claustro do Mosteiro de Santa Maria de Belém' in, *Cadernos de História de Arte I*, Lisboa, 1991.

165. MARQUES, Lina M. Oliveira, *Estruturas e Espaço das Igrejas-Salão Manuelinas*, Actas dos 3ºs Cursos Internacionais de Verão de Cascais, 1996.
166. MARTINEZ, J.G. ; SILVA, R., 'Huguet, Boytac y el tardogótico peninsular', in *O largo tempo do Renascimento. Arte, propaganda e poder.*
167. MATEUS, João Mascarenhas, *Técnicas Tradicionais de construção de alvenarias. A literatura técnica de 1750 a 1900 e o seu contributo para a conservação de edifícios históricos*, Lisboa, Livros Horizonte, 2002, ISBN: 972-24-1234-5.
168. MATOS, Helena Maria de Araújo Carvalho, 'Estudo sobre a Sé de Braga', in *Bracara Augusta*, Nºs 9-10, Braga, 1960.
169. MATOS, José Sarmento, 'Descobrir os Jerónimos', in *Expresso*, 28-Junho 1986.
170. MENDES, Octávio da Silva Paes, *Santarém Monumental: Roteiro*, Comissão Cultural, Desporto e Tempos Livres, C.M. de Santarém, 1988.
171. MILHEIRO, Ana Cristina Fernandes Vaz, *O gótico e os sistemas de desenho presentes na arquitectura oitocentista - produções teóricas europeias e a recensão portuguesa manifesta na obra escrita de Possidónio da Silva* (texto policopiado), tese de mestrado, Faculdade de Arquitectura, Universidade Técnica de Lisboa, 1997.
172. Ministério das Obras Públicas, Relatório da Actividade do Ministério no Ano de 1952, Lisboa, 1953.
173. Ministério das Obras Públicas, Relatório da Actividade do Ministério no Ano de 1955, Lisboa, 1956.
174. Ministério das Obras Públicas, Relatório da Actividade do Ministério no Ano de 1956, Lisboa, 1957.
175. Ministério das Obras Públicas, Relatório da Actividade do Ministério nos Anos de 1957 e 1958, 1º Vol., Lisboa, 1959.
176. Ministério das Obras Públicas, Relatório da Actividade do Ministério no Ano de 1959, 1º Vol., Lisboa, 1960.
177. Ministério das Obras Públicas, Relatório da Actividade do Ministério no Ano de 1961, 1º Vol., Lisboa, 1962.
178. Ministério das Obras Públicas, Relatório da Actividade do Ministério no Ano de 1962, 1º Vol., Lisboa, 1963.
179. MIRANDA, Maria Adelaide; VIEIRA DA SILVA, José Custódio, *História da Arte Portuguesa: Época Medieval*, Universidade Aberta, Lisboa, 1995.
180. MONTEIRO, Manuel, 'A Matriz de Vila do Conde. Inícios de uma Restauração', in *O Primeiro de Janeiro*, Porto, 13 de Novembro de 1904.
181. MONTEIRO, Manuel, *Igrejas Medievais do Porto*, Porto, Marques Abreu, 1954.
182. MONTEIRO, Soraya, *Étude descriptive de la voûte de l'Église du monastère Santa Maria de Belém à Lisbonne*, (Thèse de maîtrise "Master of Science in Architecture", R. Lemaire, Center for the Conservation of Historic Towns and Buildings, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 1995. (non publié).
183. *Monumentos*, *Nº 14, Paço Episcopal do Porto e envolvente*, Lisboa, 2001.
184. *Monumentos*, *Nº 18, Mosteiro de Santa Clara-a-Nova*, Lisboa, 2003.
185. *Monumentos*, *Nº13*, *Sé de Viseu e Envolvente*, Lisboa, 2000.
186. MOREIRA, Francisco de Almeida, *Imagens de Viseu*, Porto, Tipografia Porto Médico, 1937.
187. MOREIRA, Francisco de Almeida, *La catedral de Viseu: sus aspectos arquitectónicos*, Porto, s/n, 1927.
188. MOREIRA, Rafael, 'A Mais Antiga Tradução Europeia de Vitrúvio Pedro Nunes em 1537-1541', in *Tratados de Arte em Portugal* (coord.

MOREIRA, Rafael; RODRIGUES, Ana Duarte), Scribe, Lisboa, 2011, pp.51-61.
189. MOREIRA, Rafael, 'D. Miguel da Silva e as Origens da Arquitectura do Renascimento em Portugal', in *Mundo da Arte*, II Série, Nº 1, Lisboa, 1988, pp. 5- 23.
190. MOREIRA, Rafael, *A Arquitectura do Renascimento no Sul de Portugal: a encomenda régia entre o moderno e o romano*, (texto policopiado), tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências Socais e Humanas, Universidade Nova, Lisboa, 1991.
191. MOREIRA, Rafael, *A construção de Mazagão: cartas inéditas 1541-1542*, Lisboa, Instituto Português do Património Arquitectónico, 2001.
192. MOREIRA, Rafael, *Jerónimos*, Lisboa, Verbo, 1991.
193. MUCHAGATO, Jorge, *Jerónimos: memória e lugar do Real Mosteiro*, Lisboa, Inapa, 1997.
194. MURPHY, James, *Plans, Elevations, Sections and Views of the Church of Batalha*, London, I&J Taylor, High Holdborn, 1795.
195. *MURPHY: Revista de História e Teoria da Arquitectura e do Urbanismo / Journal of Architectural History and Theory*, Imprensa da Universidade de Coimbra, 2006.
196. NATIVIDADE, Manuel Vieira, *Mosteiros e coutos de Alcobaça*, Alcobaça, s/n, 1960.
197. NETO, Maria João Baptista, *A Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais e a Intervenção no Património Arquitectónico em Portugal (1929-1960)*, (texto policopiado), tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, 1995.
198. NETO, Maria João Baptista, *O Restauro do Mosteiro de Santa Maria da Vitória de 1840 a 1900*, (texto policopiado), tese de mestrado, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, 1990.
199. NEVES, Joaquim Pacheco, 'O Pórtico da Matriz', in *Vila do Conde*, Nº 5, Vila do Conde, 1964.
200. NEVES, Joaquim Pacheco, *Vila do Conde*, Secção Cultural de Vila do Conde, 1991.
201. NOVAES, Manuel Pereira de, *Anacrises Historial*, 8 Vols, Porto, Typographia Progresso, 1913.
202. *O Couseiro ou memorias do Bispado de Leiria*, (autor anónimo) Braga, Typographia Lusitana, 1868.
203. OLIVEIRA, Eduardo Pires de, 'A Sé de Braga e Dom Rodrigo de Moura Teles (1704 - 1728)', in *Struggle for Synthesis, A Obra de Arte Total nos séculos XVII e XVIII -Simpósio Internacional, Actas*, Vol. 1, Lisboa, 1998, pp. 239-252.
204. OLIVEIRA, Eduardo Pires de, *O edifício do Convento do Salvador - De mosteiro de freiras ao Lar Conde de Agrolongo*, Braga, Lar Conde do Agrolongo, 1994.
205. OLIVEIRA, Eduardo Pires de, *Os grandes ciclos de obras na sé catedral de Braga e outros estudos de arte minhota*, Braga, APPACDM, 2004.
206. OLIVEIRA, Marília; MUN, Mary; GENIN, Soraya, 'Prospecção por radar sobre as abóbadas da igreja do mosteiro dos Jerónimos', in *3ºEncore – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*, LNEC, 2003, pp. 327-354.
207. PALMA, João, 'Memórias do Portugal Velho', in *A Capital*, 29 Fev. e 7 Março 1988.
208. PASSOS, Carlos de, *Porto: Noticia histórico-archeologica e artistica da Cathedral e da egrejas de Santa Clara, S. Francisco e Cedofeita*, Porto, Marques Abreu, 1926.

209. *Património Arquitectónico e Arqueológico Classificado, Inventário*, 3 Vols, IPPAR, Lisboa, 1993.
210. *Património Arquitectónico e Arqueológico Classificado*, *Inventário*, Vol. I, Distrito de Braga, Lisboa, IPPAR, 1993.
211. PEREIRA, Fernando António Baptista, *História da Arte Portuguesa, Época Moderna (1500-1800)*, Lisboa, Universidade Aberta, 1992.
212. PEREIRA, José Fernandes, 'Resistências e aceitação do espaço barroco; a arquitectura Religiosa e civil' in *História de Arte em Portugal*, Vol. 8, Lisboa, Publicações Alfa, 1986, pp. 9- 65.
213. PEREIRA, Paulo, 'A simbólica manuelina. Razão, celebração, segredo: O Convento de Cristo', in *História de Arte Portuguesa*, Lisboa, Temas & Debates, 1999; Vol. II, pp.131-136.
214. PEREIRA, Paulo, 'As grandes Edificações (1450-1530)', in PEREIRA, Paulo (Dir.). *História da Arte Portuguesa*, Lisboa, Círculo de Leitores, 1995, Vol. II, pp.11-113.
215. PEREIRA, Paulo, 'O Estaleiro de Santa Maria de Belém', in *História da Arte Portuguesa*, Lisboa, Círculo de Leitores, 1995.
216. PEREIRA, Paulo, 'O Revivalismo: a arquitectura do Desejo', in PEREIRA, Paulo (Dir.). *História da Arte Portuguesa,* Vol. 3, Lisboa, Círculo de Leitores, 1995.
217. PEREIRA, Paulo, *A Obra Silvestre e a Esfera do Rei - Iconologia da Arquitectura Manuelino na Grande Estremadura*, Coimbra, Faculdade de Letras, Instituto de História de Arte, 1990.
218. PEREIRA, Paulo, *A obra Silvestre e a esfera do rei - iconologia da arquitectura do período manuelino na grande Estremadura (relance),* (texto policopiado), tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 1987.
219. PEREIRA, Paulo, *De Aurea Aetate - o coro do Convento de Cristo em Tomar e a simbólica Manuelina*, Lisboa, Departamento de Estudos IPPAR, 2003.
220. PEREIRA, Paulo, *Mosteiro dos Jerónimos*, Lisboa, Publicações Scala / IPPAR, 2002.
221. PERES, Damião (dir.), *História da Cidade do Porto*, 3 Vols., Porto, Portucalense Editora, 1962-1965.
222. PILOTO, Adelina; SANTOS, A. Monteiros dos, 'Igreja Matriz de Vila do Conde: meio milénio de história', in *O Tripeiro*, 7ª Série, Ano XXII, N.º1, Janeiro 2003.
223. PIMENTEL, António Filipe, 'Manuel da Silva e a difusão do Barroco nas Beiras', in *Actas VI Simpósio Luso-espanhol da História da Arte*, Tomar, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Tomar, 1996, pp. 427-455.
224. PINTADO, Francisco António, *A Igreja Matriz de Freixo de Espada-à-Cinta - Notas para o seu estudo, Freixo de Espada-à-Cinta*, (a publicar).
225. PINTO-COELHO, Maria João, *Património Mundial, World Heritage: Portugal*, Lisboa, Estar Editora, 1997.
226. POLÓNIA, Amélia, *Vila do Conde: um porto nortenho na expansão ultramarina quinhentista*, (texto policopiado), tese de doutoramento, Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 1999.
227. Processo Administrativo da Sé do Porto, 1857; Processo Administrativo da Sé do Porto, 1858 (zona de protecção); Arquivo do extinto CRUARB - CMP: Dossier "Freguesia da Sé".

228. QUARESMA, Maria Clementina Carvalho, *Inventário Artístico de Portugal: cidade do Porto*, Lisboa, Academia Nacional de Belas-Artes, 1995.
229. RACZYNSKi, Atanazy, *Les Arts en Portugal: lettres adressées a la societé artistique et scientifique de Berlin,* Paris, Jules Renouard, 1846.
230. RAMOS, Graça, *Portugal Património da Humanidade*, Lisboa, Aqualarga, 1996.
231. RAMOS, Maria Teresa Calheiros Figueiredo de Oliveira, *Uma igreja manuelina Vilar de Frades: Elementos para o seu estudo*, Seminário de História da Arte em Portugal para a licenciatura em Ciências Históricas pela Universidade Portucalense, S/I, s/n, 1991.
232. RASQUILHO, Rui, *Roteiro histórico-turístico da região de Alcobaça*, Alcobaça, Tabacaria Rossio, 1980.
233. REAL, Manuel Luís, 'O projecto da catedral de Braga, nos finais do século XI, e as origens do românico português' in *IX Centenário da Dedicação da Sé de Braga. Congresso Internacional, Actas*, Braga, Universidade Católica Portuguesa, 1990, Vol. I, pp. 435 – 511.
234. REBANDA, Nelson; CAVALHEIRO, Eugénio, *A igreja matriz de Torre de Moncorvo*, Mirandela, João Azevedo, 1998.
235. *Restauro da Abóbada da Charola do Convento de Cristo*, IPPAR, Tomar, 2000.
236. Resumos das Comunicações no Tema: A Urbanística, a Arquitectura e a Escultura na época dos Descobrimentos, in *Congresso Internacional Os Descobrimentos Portugueses e a Europa do Renascimento*, XVII Exposição Europeia de Arte, Ciência e Cultura, Comissariado para a XVII Exposição Europeia de Arte, Ciência e Cultura, Lisboa, 1983.
237. RIBEIRO, Margarida, 'Olaria de uso doméstico na arquitectura conventual do século XVI', in *Cadernos de Etnologia* , Nº1, Grupo de Amigos de Montemor-o-Novo, 1984, pp.15-33.
238. RODRIGUES, Ana Duarte, 'The Circulation of the Art Treatises in Portugal Between the XV and the XVIII Centuries: Some Methodological Questions', in *Tratados de Arte em Portugal* (coord. MOREIRA, Rafael; RODRIGUES, Ana Duarte), Scribe, Lisboa, 2011, pp.21-42
239. ROSA, Amorim, *História de Tomar*, 2 Vols., Tomar, Gabinete de Estudos Tomarenses, 1965.
240. ROSAS, Lúcia Maria Cardoso, *Monumentos Pátrios: a arquitectura religiosa medieval, património e restauro (1835-1928),* (texto policopiado), tese de Doutoramento em História de Arte, Universidade do Porto, 1995.
241. RUÃO, Carlos, 'A Arquitectura da Sé Catedral de Viseu', in *Monumentos*, Nº 13, Lisboa, Setembro de 2000, pp. 12-19.
242. S. LUIZ, D.Francisco, 'Memória Histórica sobre as Obras do Real Mosteiro de Santa Maria da Vitória, vulgramente chamado da Batalha' in *Obras Completas do Cardeal Saraiva,* Lisboa, Imprensa Nacional, Vol. I, 1872.
243. S. MIGUEL, Frei Jacinto de, [Papéis vários], B.N., Reservados, códice 8842, c.1700.
244. SANTA MARIA, Frei Francisco de, *O Céu Aberto na Terra*, Lisboa, Officina de Manoel Lopes Ferreyra, 1697.
245. SANTA MARIA, Frei Nicolau de, *Chronica da Ordem dos Conegos Regrantes do Pathriarca S. Agostinho*, Livro V, Lisboa, Officina de Joam da Costa, 1668.
246. SANTANA, Francisco; SUCENA, Eduardo, (Dir.), *Dicionário da História de Lisboa*, Sacavém, Carlos Quintas & Associados-Consultores, 1994.

247. SANTOS, Frei Manuel dos; (AIRES, Nascimento compil.) *Descrição do Real mosteiro de Alcobaça*, Alcobaça, Associação para a defesa e valorização do património cultural da região de Alcobaça, Alcobaça, 1979.
248. SANTOS, José António, *Monumentos das Ordens Militares do Templo e de Christo em Thomar*, Lisboa, Tipografia da Biblioteca Universal, 1879.
249. SANTOS, Reynaldo dos, 'Mosteiro dos Jerónimos' in *Guia de Portugal*, Vol. 1, Lisboa, Biblioteca Nacional de Lisboa, 1924, pp. 392 – 407.
250. SANTOS, Reynaldo dos, 'O Portal da Igreja Matriz de Vila do Conde', in *Vila do Conde*, nº 3, Vila do Conde, 1961.
251. SANTOS, Reynaldo dos, 'Tomar', in, *Guia de Portugal*, Vol. II, Lisboa, Biblioteca Nacional de Lisboa, 1927.
252. SANTOS, Reynaldo dos, *O Mosteiro de Belém: (Jerónimos)*, Porto, Marques Abreu, 1930.
253. SANTOS, Reynaldo dos, *Oito séculos de Arte Portuguesa: História e Espírito*, Vol. I, Lisboa, Empresa Nacional de Publicidade, 1970.
254. SANTOS, Reynaldo, *O Estilo Manuelino*, Lisboa, 1952.
255. SARMENTO, Zeferino, *História e monumentos de Santarém*, Câmara Municipal de Santarém, 1993.
256. SEGURADO, Jorge, 'Juan de Herrera em Portugal', in *As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos descobrimentos, II Simpósio Luso-Espanhol de História da Arte*, Coimbra, Edições Minerva, 1987, pp. 99-111.
257. SENOS, Nuno, 'João de Castilho e Miguel de Arruda no Mosteiro da Batalha', in *MURPHY: Revista de História e Teoria da Arquitectura e do Urbanismo / Journal of Architectural History and Theory*, Imprensa da Universidade de Coimbra, Julho, 2007.
258. SEQUEIRA, Gustavo de Matos, *Inventário Artístico de Portugal - Distrito de Leiria*, Vol.5, Lisboa, Academia Nacional de Belas-Artes, 1955.
259. SEQUEIRA, Gustavo de Matos, *Inventário Artístico de Portugal - Distrito de Santarém*, Vol. 3, Lisboa, Academia Nacional de Belas-Artes, 1949.
260. SERRÃO, Joaquim Veríssimo, *Santarém: História e Arte*, Comissão Municipal de Turismo de Santarém, 1959.
261. SERRÃO, Vítor, *Santarém*, Lisboa, Presença, 1990.
262. SILVA, J. da, *Mémoire descriptif du project d'une restauration pour l'église monumentale de Belem à Lisbonne bâti en 1500 en souvenir de la découverte de l'Inde par les navigateurs Portugais: Modéle fait pour l'exposition de Paris 1867 d'aprés les dessins de l'arhitecte de S.M. le roi de Portugal*, Lisbonne, Latlemant Freres Typ., 1867.
263. SILVA, Manuel, Joaquim Moreira da, *Manuel Fernandes da Silva: Mestre e Arquitecto de Braga: 1693-1751*, Porto, Centro de Estudos D. Domingos de Pinho Brandão, 1996.
264. SILVA, Ricardo, 'A Abóbada da Capela-Mor da Igreja de Nossa Senhora do Pópulo das Caldas da Rainha. Construção e filiação', Separata da Revista *Artis*, Instituto da História da Arte, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Nº 5, Dezembro 2006, pp. 105-124.
265. SILVA, Ricardo, Abóbadas tardo-medievais em Portugal: tipologias e concepção, tese de mestrado na Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, 2005.
266. SMITH, Robert, *The Art of Portugal: 1500-1800*, London, Weidenfeld and Nicolson, cop, 1968.

267. SOARES, Clara Moura, *A lavra das pedreiras e o estaleiro das obras de restauro do Mosteiro de Santa Maria da Vitória no Século XIX*, (texto policopiado), tese de mestrado, Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, 1999.
268. SOARES, Clara Moura, *O restauro do Mosteiro da Batalha*, Leiria, Magno, 2001.
269. SODRÉ, Baltazar, *Memorial de Vilar de Frades*, Man. Torre do Tombo, 23, B. 44. 25.
270. SOUSA, Frei Luís de, *Primeira Parte da História de S. Domingos*, Lisboa, Officina de António Rodrigues Galhardo, 1767.
271. STATUA, Atelier de Escultura Conservação e Restauro, *Estudo sobre o estado de conservação da Igreja Matriz de Vila do Conde*, Lisboa, 1997.
272. *Structural monitoring of the Monastery of Jeronimos*, http://hdl.handle.net/1822/4994.
273. TAVARES, José Augusto, *Monografia de Nª Sª da Teixeira, extinto ermitério*, Moncorvo, Associação Cultural e Recreativa de Sto. Cristo, 1985.
274. TEIXEIRA, Garcez, *Anais da União dos Amigos dos Monumentos da Ordem de Cristo (UAMOC)*, vol. I, tomo 1º, 1919.
275. *Tesouros Artísticos de Portugal*, (dir. ALMEIDA, José António Ferreira de), Lisboa, Selecções do Reader's Digest, 1976.
276. TOMÉ, Miguel Jorge B. Ferreira, *Património e Restauro em Portugal (1920 - 1995),* (texto policopiado), tese de mestrado em História da Arte em Portugal, Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 1998.
277. VASCONCELLOS, Joaquim de, *Arte Românica em Portugal*, Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1992.
278. VASCONCELOS, Joaquim de, 'A Batalha', in *Arte e Natureza*, Vol. 5, Lisboa, 1905.
279. VASCONCELOS, Joaquim de, 'Porto: Sé Catedral', in *Arte Religiosa em Portugal*, Vol. I, fasc.1, Porto, Emílio Biel & C.ª Editores, 1914.
280. VASCONCELOS, Pe. Inácio da Piedade, *História de Santarém Edificada*, Lisboa Occidental, 1740.
281. VAZ, João Luís da Inês, 'Espaço e tempo na Acrópole de Viseu', in *Monumentos*, N.º 13, Lisboa, Setembro de 2000, pp. 44-51.
282. VIEIRA DA SILVA, José Custódio, *A Igreja de Jesus de Setúbal,* Salpa, Setúbal, 1987, p.35.
283. VIEIRA DA SILVA, José Custódio, *O Tardo Gótico em Portugal, A arquitectura no Alentejo*, Lisboa, Livros Horizonte, 1989.
284. VIEIRA, José Augusto, *O Minho Pittoresco*, tomo II, Lisboa, Livraria de António Maria Pereira, 1887.
285. VILLAR, Julián Alvarez, 'Ecos Hispanicos del Manuelino', in *As relações artísticas entre Portugal e Espanha na época dos descobrimentos, II Simpósio Luso-Espanhol de História da Arte*, Coimbra, Ed. Minerva, 1987, pp.79-95.
286. VINHAS, Joaquim Alves, *A Igreja e o Convento de Vilar de Frades: das origens da Congregação dos Cónegos Seculares de São João Evangelista (Lóios) à extinção do Convento, 1425 – 1834*, (texto policopiado), tese de mestrado em História da Arte, Universidade do Porto, 1996.
287. VINHAS, Joaquim Alves, *A Igreja e o Convento de Vilar de Frades: das origens da Congregação dos Cónegos Seculares de São João Evangelista (Lóios) à extinção do convento, 1425-1834*, Barcelos, MC e IPPAR, 1998.
288. VITERBO, Francisco de Sousa, *Dicionário Histórico e Documental dos Architectos, Engenheiros e Construtores Portugueses ou a serviço de Portugal*, 3 Vols., Lisboa, Imprensa Nacional, 1899-1922.

289. VITORINO, Manuel, 'IPPAR recupera secular mosteiro de Vilar de Frades', in *Jornal de Notícias*, 3 de Dezembro de 2002, p. 30.
290. VITORINO, Pedro, *Mosteiro da Batalha*, Porto, Marques Abreu, 1955.
291. WATSON, Walter Crum, *Portuguese Architecture*, London, Archibald Constable and Company, 1908.

Bibliographie Générale

1. ABBATE, Francesco, *The planning and building instruments of architects in the middle ages*, in Proceedings of the Second International Congress on Construction History, Queens' College Cambridge University, 29th March – 2nd April 2006, Construction History Society, Cambridge UK 2006, pp. 111-125.
2. ABRAHAM, Pol, "Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval", in *Bulletin Monumental*, vol. 93, Société Française d' Archéologie, Musée des Monuments Français, Paris, 1934, pp.69-88.
3. ACKERMAN, James S., "Villard de Honnecourt's Drawings of Reims Cathedral: a study in architectural representation", in *Artibus et Historiae,* vol. 18, nº 35, 1997, pp. 41-49.
4. ACKERMAN, James S., "Architectural Practice in the Italian Renaissance", in *Journal of Society of Architectural Historians,* vol. 18, nº 3, 1954, pp. 3-11.
5. ACKERMAN, James S., "Ars Sine Scientia Nihil Est' Gothic Theory of Architecture at the Cathedral of Milan," in *The Art Bulletin,* Vol. 31, Nº. 2, 1949, pp. 84-111.
6. ACLAND, James H., *Medieval Structures: The Gothic Vault*, University of Toronto Press, Toronto, 1972.
7. ALEXANDER, D. K.; MARK, R., The *Structural Behavior of Medieval Ribbed Vaulting*, in Journal of the Society of the Architectural Historians, vol. 36, 1977, pp. 241-251.
8. ALONSO RODRÍGUEZ, Miguel Ángel; CALVO LÓPEZ, José; RABASA DÍAZ, Enrique, "Sobre la configuración constructiva del crucero de la catedral de Segovia", in *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2009, p. 53-62.
9. ALONSO RUIZ, Begoña, *La arquitectura tardogótica castellana entre Europa y América*, Sílex Ediciones S.L., Madrid, 2011.
10. ALONSO RUIZ, Begoña, "The Construction of the Cathedral of Segovia from Juan Guas to Juan Gil de Hontañón », in *Proceedings of the*

Third International Congress on Construction History, Cottbus, Mayo 2009, Cottbus, pp. 39-46.

11. ALONSO RUIZ, Begoña, "El cimborrio de la magna hispalense", in Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Cádiz, 27-29 de enero de 2005, Vol. I, Santiago Huerta (ed.), Madrid, 2005, pp. 21-33.
12. ALONSO RUIZ, Begoña, *Arquitectura tardogótica en Castilla: los Rasines*, Universidad de Cantabria/Colegio de Arquitectos de Cantabria, Santander, 2003.
13. ALONSO RUIZ, Begoña, "La capilla gótica y la renacentista: Juan Gil de Hontañón y Diego de Siloé en La Vid", in Anuario del Departamento de Historia y Teoría del Arte de la Universidad Autónoma de Madrid, Vol. XV, 2003, pp. 45-57.
14. ALONSO RUIZ, Begoña, "Juan Gil de Hontañón en Segovia: sus comienzos profesionales", in Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología: BSAA, Tomo 66, Universidad Valladolid, 2000, pp. 153-162.
15. ALVAREZ LUNA, María de los Ángeles; GUERRERO VEGA, José María; ROMERO BEJERANO, Manuel, "Los problemas estructurales de la parroquia de Santiago de Jerez de la Frontera: los sistemas de construcción aplicados a la restauración monumental", in Actas del *Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*: Cádiz, 27-29 de enero de 2005, Vol. I, Santiago Huerta (ed.), Madrid, 2005, pp. 35-47.
16. ARAMBURU ZABALA HIGUERA, Muiguel A.; LOSADA VAREA, Maria Celestina; CAGIGAS ABESRASTURI, Ana, *Los canteros de Cantabria,* Santander: Colegio Oficial de Aparejadores y arquitectos técnicos de Cantabria, 2005
17. AUBERT, M., *Les plus anciennes croisées d'ogives. Leur rôle dans la construction*, A. Picard, Paris, 1934.
18. BAEHR H. P., "The Use of Photogrammetry in the Analysis of Deformation " , in *Stable-unstable? Structural Consolidation of Ancient Buildings,* Lemaire, R. M.; Van Balen, K. Editors, Leuven University Press, Leuven, 1988, pp.157-166.
19. BALBÁS, Torres, *Ars Hispaniae: historia universal del arte hispánico. Arquitectura gótica*, Vol. 7, Plus-Ultra Edit., Madrid, 1952.
20. BARNES, Carl F. Jr., "America The Gothic Architectural Engravings in the Cathedral of Soissons", in *Speculum*, Vol. 47, nº 1, Medieval Academy of America, 1972, pp. 60-64.
21. BARTHEL, Rainer, MAUS, H. W., JAGFELD, M., "Artistry and Ingenuity of gothic vaults at the examples of St. Georg in Nördlingen", in *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*, Cambridge 2006, S. 3279-3296, pp. 309-323.
22. BARTHEL, Rainer, MAUS, H. W., JAGFELD, M., "Artistry and Ingenuity of Gothic Vaults at the Examples of St. Georg in Nördlingen", In: *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*, Vol. 1, Cambridge 2006, pp. 309-323.
23. BECHMAN Roland, *Les racines des cathédrales : l'architecture gothique, expression des conditions du milieu*, Ed. Payot, Paris, 1989.
24. BECHMAN Roland, Villard de Honnecourt, *La pensée technique au XIIIème siècle et sa communication*, Picard, Paris, 1991.

25. BENVENUTO, E., *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Sansoni, Firenze, 1981.
26. BERANEK W.J., "Understanding of Structures", in *Stable-unstable? Structural Consolidation of Ancient Buildings*, Lemaire, R. M, Van Balen, K. Editors, Leuven University Press, Leuven, 1988, pp. 29-43.
27. BOLGIA, Claudia, "An Engraved Architectural Drawing at Santa Maria in Aracoeli, Rome", in *Journal of the Society of Architectural Historians*, Vol. 62, No. 4, University of California Press, Society of Architectural Historians, 2003, pp. 436-447.
28. BÖKER, Johann Joseph, BREHM, Anne-Christine, HANSCHKLE, Julian, SAUVÉ, Jean-Sébastien, *Architektur der Gotik: Rheinlande. Ein Bestandkatalog der mittelalterlichen Architekturzeichnungen*, Salzburg 2013.
29. BÖKER, Johann Josef, BREHM, Anne-Christine, HANSCHKLE, Julian, SAUVÉ, Jean-Sébastien, *Architektur der Gotik: Ulm und Donauraum : ein Bestandskatalog der mittelalterlichen Architekturzeichnungen aus Ulm*, Schwaben und dem Donaugebiet, Salzburg, Wien, Mury Salzmann, 2011.
30. BORK, Robert, *The geometry of creation: Architectural Drawings and the dynamics of Gothic design,* Farnham: Ashgate, 2011.
31. BRANNER, Robert, *Villard de Honnecourt, Reims and the Origin of the Gothic Architectural Drawing*, Gazette des Beaux-Arts, 6 ser. Vol. 61, Paris, 1963, pp. 129-146; reprint in The Engineering of Medieval Cathedrals, ed. Lynn T. Courtenay, Studies in the History of Civil Engineering, Vol. 1, Ashgate Publishing Ltd., Wisconsin-Madison, 1997, pp. 63-80.
32. BUCHER, François, *Architector: The Lodge Books and Sketchbooks of Medieval Architects*, vol. 1, Abaris Books, New York, 1979, pp. vi, 411, plus 402 plates and 74 figures.
33. BUCHER, François, "Design in Gothic Architecture: A Preliminary Assessment", The *Journal of the Society of Architectural Historians*, Vol. 27, Nº 1, 1968, pp.49-71.
34. BÜRGER, Stefan, *Figurierte Gewölbe zwichen Saale und Neisse: Spätgotische Wölbkunst von 1400 bis 1600*, 3 Teilbände, Weimar: VDG Weimar Auflage: vol. 1-3, 2007.
35. CALVO LÓPEZ, José, "Estereotomía de la piedra", in *I Master de Restauracíon del Patrimonio Historico*, Murcia: Colegio de Arquitectos, Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 2005, pp. 115-151.
36. CALVO LÓPEZ, José; ALONSO RODRIGUEZ, M. A.; RABASA DÍAZ, E., LÓPEZ MOZO, A., *Cantería renacentista en la catedral de Murcia*. Colegio de Arquitectos de Murcia. Murcia. 2005.
37. CALVO LÓPEZ, José, *Cerramientos y trazas de montea de Ginés Martínez de Aranda*, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escola Superior de Arquitectura, 2000.
38. CASASECA CASASECA, Antonio, *Rodrigo Gil de Hontañón*, Rascrafría, 1500 – Segovia, 1577, Junta de Castilla y León, Salamanca, 1988, pp. 66-70.

39. CASTRO SANTAMARÍA, Ana, *Juan de Alava, arquitecto del Renacimiento*, Edite. Caja Duero, Salamanca, 2002.
40. CHOISY, Auguste, *Histoire de l'Architecture*, 2 Vols., Gauthier – Villars, Paris, 1899
41. CHOISY, Auguste, *L'art de bâtir chez les Romains : Planches*, Ducher, Paris, vol. 2, 1873.
42. CHUECA GOITIA, Fernando, *Historia de la arquitectura española: edad moderna y contemporánea,* Avila: Fundación Cultural Santa Teresa; Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 2001.
43. CHUECA GOITIA, Fernando, *Historia de la arquitectura española: edad antigua y edad media, Avila:* Fundación Cultural Santa Teresa; Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 2001, Edición facsímil de la editada en 1964
44. CHUECA GOITIA, Fernando, *La catedral nueva de Salamanca, historia documental de su construcción*, Universidad de Salamanca, Salamanca, 1951.
45. CLASEN, Karl Heinz, *Deutsche gewölbe der spätgotik*, Bauakademie der DDR (edit), Henschelverlag, Berlin, 1958.
46. COFIÑO FERNÁNDEZ, Isabel, *Arquitectura religiosa en Cantabria, 1685-1754*, Santander: Univesidad de Cantabria, 2004
47. COLOMBIER, Pierre, *Les chantiers des cathédrales,* Nouvelle édition revue et augmentée, Paris, Picard, 1973
48. CÓMEZ, Rafael, *Los constructores de la España medieval*, 2 ed., Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones, 2006
49. DE JONGE, Krista. « Scientie » et « experientie » dans le gothique moderne des anciens Pays-Bas ». In Chatenet M., De Jonge K., Kavaler E., Nussbaum N. (Eds.), *Le Gothique de la Renaissance.* Paris, Picard, 2011, 199-216.
50. DERAND, François, *L'Architecture des voûtes, ou l'art des traits, et coupes des voutes : traité très utile et nécessaire à tous les architectes, maîtres massons, appareilles,* réédite : 1743, 1755, chez Sébastien Cramoisy, Paris,1643.
51. DI PASCUALE, Salvatore, "Questions concerning the mechanics of masonry", in *Stable-unstable? Structural Consolidation of Ancient Buildings*, R. M. Lemaire; Van Balen, K. Editors, Leuven Centre for the Conservation of Historic Towns and Buildings, Leuven University Press, Leuven, 1988, pp. 249-264 .
52. DI PASQUALE, Salvatore, "Structural Analysis of the Dome of Florence", in Final Report of the IABSE Symposium *Strenghtening of building structures: diagnosis and therapy*, Venezia 1983, vol.46, Session 3: Mathematica and Phisycal Models, IABSE, Zurich 1983, pp.161-168.
53. DOMINGUEZ, Rosa Senent, « Las bóvedas irregulares del tratado de Vandelvira. Estrategias góticas en cantería renacentista », in Actas del *Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, 26 – 29 Octubre, 2011, Universidad Politecnica de Valencia, SANTIAGO HUERTA, Fernandez, et al. (ed.), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 1329-1338.
54. DU COLOMBIER, Pierre, *Les Chantiers des cathédrales*, Picard, Paris, 1953.

55. EALO DE SÁ, María, *El arquitecto Juan de Castillo: el constructor del mundo: o construtor do mundo*, col. Alberto Luna, Santander : Colegio Oficial de Arquitectos de Cantábria, 2009.
56. EALO DE SÁ, María, *El arquitecto Juan de Castillo : documentos históricos*, 2 vol., s.n., Merindad de Trasmiera, 1991-1992.
57. ETLIN, Richard A.; FALLACARA, Giuseppe; TAMBORERO, Luc, *Plaited stereotomy: stone vaults for the modern world*, Arcane, Roma, 2008
58. FITCHEN, John, *Building construction before mechanization*, MIT Press, Cambridge Mass, 1989.
59. FITCHEN, John, *The Construction of Gothic Cathedrals: A Study of Medieval Vault Erection*, The Clarendon Press, Oxford, 1961.
60. FRANKL, Paul, *Gothic architecture,* Crossley, Paul (Edit.), Penguin Books, London, 1962
61. GARCÍA GUTIERREZ-MOSTEIRO, Javier, *Cuaderno de apuntes de construcción de Luis Moya, curso 1924-25*, Instituto Juan de Herrera. Madrid, 1993.
62. GARCÍA, Esther de Vega, « Angevinas o aquitanas? Bóvedas cupuladas protogóticas en Castilla-León », in *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción,* 26 – 29 Octubre, 2011, Universidad Politecnica de Valencia, SANTIAGO HUERTA, Fernandez, et al. (ed.), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 1437-1446.
63. GARCÍA, Simón, *Compendio de arquitectura y simetría de los templos: conforme a la medida del cuerpo humano: con algunas demostraziones de geometria. Año de 1681. Recoxido de dibersos autores, naturales y estrangeros. Por Simón Garcia. Architecto natural de Salamanca. 1681*, Ed. a cargo de Antonio Bonet Correa y Carlos Chanfón Olmos, Colegio Oficial de Arquitectos en Valladolid, Valladolid, 1991.
64. GIMPEL Jean, *Les bâtisseurs des cathédrales*, Seuil, Paris, 1985.
65. GÓMEZ MARTÍNEZ, Javier, « El arte de la montea entre Juan y Simón de Colonia », in *Actas del Congreso Internacional sobre Gil Siloé y la escultura de su época*. Burgos 13-16 octubre de 1999, Centro Cultural 'Casa del Cordón', Academia Burgense de Historia y Bellas, Burgos, 2001. pp. 355-366.
66. GÓMEZ MARTÍNEZ, Javier, *El gótico español en la Edad Moderna: bóvedas de crucería*. Universidad de Valladolid, Valladolid. 1998.
67. GONZÁLES ECHEGARAY, M.C et all, *Artistas cántabros de la Edad Moderna*: *Su aportación al arte hispánico.* Diccionario biográfico-artístico, Universidad de Cantabria/Fundación Mazarrasa, Santander, 1991
68. GONZÁLEZ ECHEGARAY, M. C. et al., *Artistas cántabros de la Edad Moderna: su aportación al arte hispánico*, Universidad de Cantabria, 1991.
69. HALLEUX, Pierre, *«* Le siècle des cathédrales. L'innovation gothique », in Bruxelles Patrimoines, nº 3-4, Région de Bruxelles-capitale, septembre 2012, pp. 27-37.

70. HALLEUX, Pierre, « La voûte gothique: une audace de bâtisseur? » , in *Annales Travaux publics*, nº5, 1989, pp.429-454.
71. HATOT, Thierry. *Bâtisseurs au Moyenne Age*. Collection Compas, Clermont-Ferrand : L'Instant Durable, 2009.
72. HEYMAN J., « Chronic Defects in Masonary Vaults: Sabouret's Cracks », in *Monumentum,* vol.26, nº2, june 1983, pp. 131-141.
73. HEYMAN J., « Beauvais Cathedral », in *Transaction - Newcomen Society for the History of Engineering and Technology*, Ed. Newcomen Society, London, Vol. 40, 1967-1968, pp.15-35.
74. HEYMAN, Jacques, *Equilibrium of Shell Structures*, Oxford University Press, Oxford 1977.
75. HEYMAN, Jacques, « On the Rubber Vaults of the Middle Ages, and other Matters », in *Gazette des Beaux-Arts*, t. 71, mars 1968, pp.177-188.
76. HEYMAN, Jacques, « Spires and Fan Vaults », in *International Journal of Solids Structures*, vol. 3, 1967, pp. 243-257.
77. HEYMAN, Jacques, "The Stone Skeleton", in *International Journal of Solids Structures*, vol.2, 1966, pp.249-279.
78. HEYMAN, Jacques, « Structural Analysis of Masonry », in *Journal of the Cambridge Un. Eng. Soc*., vol. 37, 1967, UK. 1997, pp. 47-59.
79. HOAG, John D., *Rodrigo Gil de Hontañón: Gotico y Renacimiento en la arquitectura española del XVI.* Xarait Ediciones. Madrid. 1985.
80. HOFFSTADT, Frédéric, *Principes du Style Gotique, exposés d'après des documents authentiques du Moyen Âge avec 40 planches in-folio, à l'usage des artistes et des ouvriers.* Traduit de l'Allemand par Théodore Aufschlager. Liège: E. Noblet, 1851.
81. HOWARD F. E., « Fan Vaults », in *Archaeological Journal* vol. XVIII, Royal Archeological Institute of Great Britain and Ireland, London, 1911, 2nd ser. vol. XVIII, pp. 1-42.
82. HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "Technical challenges in the construction of gothic vaults: The gothic thoery of structural design", in: *Construction Techniques in the Age of Historicism. From Theories of Gothic Structures to Building Sites in the 19th Century*, U. Hassler, Ch. Rauhut y S. Huerta, eds. München: Hirmer, 2012, pp. 162-195.
83. HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, « Las reglas estructurales del gótico tardío alemán », in: *Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Burgos, 7-9 junio 2007, M.* Arenillas, C. Segura, F. Bueno, S. Huerta, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, CICCP, CEHOPU, 2007, pp. 519-530.
84. HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, "Mecánica de las bóvedas de la catedral de Gerona". In: *Seminari sobre l'estudi i la restauració estructural de les catedrals gòtiques de la corona Catalano-Aragonesa*. Servei de Publicacions de la Universitat de Girona, Gerona, 2004, pp. 179-204.
85. HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, *Arcos, bóvedas y cúpulas: Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica,* Instituto Juan de Herrera. Instituto Juan de Herrera, Escuela Superior de Arquitectura, Madrid. 2004.

86. HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, “The medieval ‘scientia' of structures: the rules of Rodrigo Gil de Hontañón”, In: *Towards a History of Construction. Between Mechanics and Architecture*, Birkhäuser Verlag, Basel, 2002, pp. 567-585
87. HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago, *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca. 1500- ca. 1800.* Universidad Politécnica de Madrid. E. T. Superior de Arquitectura, Madrid, 1990.
88. JIMÉNEZ MARTIN, Alfonso (ed.), *La Piedra Postera. Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final*, Sevilla, 26 – 31 Marzo 2007. Vol. 1, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla, 2007.
89. JIMÉNEZ MARTIN, Alfonso, PINTO PUERTO, Francisco S., « Monteas en la catedral de Sevilla », in *EGA: revista de expresión gráfica arquitectónica*, n. 1, Universidad Politécnica de Valencia, 1993, pp. 79-84.
90. JOWAY H. F., « Etude de la structure d'édifices gothiques », in *Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics*, nº 363, 1978, pp.54-70.
91. JOWAY, H. F., « Usages particuliers de l'acier pour la restauration d'édifices anciens », in *Acier, Stahl, Steel*, Vol. 31, sept. 1966, pp. 369-372.
92. KUBLER, George, « A Late Gothic Computation of Rib Vault Thrusts », in *Gazette des Beaux-Arts*, série 6, vol. 26, 1944, pp. 135-148.
93. LASSAUX, M. de, “Description of a mode of erecting light vaults over churches and similar spaces*”,* in *Journal of the Royal Institution of Great Britain*, London, John Murray, 1831, vol. I, pp. 244-40.
94. *Le Gothique de la Renaissance,* actes des quatrièmes rencontres d’architecture européenne, De Jonge, Krista, Ed. Chatenet, Monique, Ed. Kavaler, Ethan Matt, Ed. Nussbaum, Norbert, Ed. De Architectura, Paris, Picard, 2011.
95. LEEDY, Walter C. Jr., *Fan vaulting: A study of form, technology, and meaning*. Scolar Press, AATA n. 19-1178, London. 1980.
96. LUNA, Manuel Fortea, *La iglesia de la Magdalena de Olivenza - modelo del gótico portugués*, thèse de doctorat., Universidade de Coimbra, Faculdade de Letras, Coimbra, 2001.
97. MAINSTONE, Rowland, *Questioning Hagia Sophia, in The Structure of Hagia Sophia, from the Age of Justinian to the Present*, Princeton University Press, Princeton, 1990.
98. MAINSTONE, Rowland, *«* Structural Theory and Design before 1742 », *in Architectural Review,* 143 Apr., 1968, pp. 303.310; (reprinted in idem, *Structure in Architecture: history, design, and innovation,* Aldershot, Hampshire; Brookfield, Vt. : Ashgate, c1999 Collected studies: CS 659.
99. MAINSTONE, Rowland, “Stability Concepts from the Renaissance to Today”, in *Stable-unstable? Structural Consolidation of Ancient Buildings*, LEMAIRE R.M. et VAN BALEN K. (Ed.), M&I studies, Leuven University Press, Leuven, 1988, pp. 65-78.
100. MAINSTONE, Rowland, *Developments in structural Form*, MIT Press, Cambridge, MA, 1975.

101. MARÍAS, Fernando, « Piedra y ladrillo en la arquitectura, española del siglo XVI », in *Les Chantiers de la Renaissance,* Actes des Colloques tenus à Tours en 1983-1984, études réunis par Jean Guillaume, Université de Tours – Centre d'Étude Supérieurs de la Renaissance, Picard, Paris, 1991, pp. 71-83.

102. MARK, Robert, "Robert Willis, Viollet-le-Duc and the structural approach to Gothic architecture", In *Architectura*, V.7.1/77, 1977, pp. 52-64; reprint in *The Engineering of Medieval Cathedrals*, Series Studies in the History of Civil Engineering, Lynn T. Courtenay (Edit.), University of Wisconsin-Madison, Ashgate Variorun, 1997

103. MARTÍNEZ DE ARANDA, Ginés. 1556-1620, *Cerramientos y trazas de montea*, Manuscrito Finales séc. XVI, Ed. facsímil CEHOPU, introducción A. Bonet Correa, Biblioteca CEHOPU, Madrid, 1986.

104. MARTÌNEZ, Javier Gómez, *El Gotico español de la edad moderna: bovedas de cruceria,* Universidad de Valladolid, 1998.

105. MARTÌNEZ, Javier Gómez, SILVA, Ricardo, "Huguet, Boytac y el tardogótico peninsular", in *O largo tempo do Renascimento: arte, propaganda e poder*, (coord.) Maria José Cantera, Vítor Serrão, Caleidoscópio/Centro de História da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2008, pp. 311-355.

106. MARTINEZ, Javier Raposo, "Terminologia arquitectónica del Libro III del De Architectura de Vitruvio en la primera edición española de 1582 de Miguel de Urrea", in *Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción:* Santiago de Compostela 26-29 octobre 2011, eds. S. Huerta, I. Gil Crespo, S. García, M. Taín. Madrid, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 1157.

107. MCGEE, J. David, « The "Early Vaults" of Saint-Etienne at Beauvais » , in *Journal of the Society of Architectural Historians*, v. 45, JSAH, Philadelphia, PA, USA, 1986, pp.20-31.

108. MOYA, Luis. *Cuaderno de apuntes de construcción de Luis Moya, curso 1924-25*. Ed. Javier García-Gutierrez Mosteiro, Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superiorde Arquitectura de Madrid, Madrid, 1993.

109. MÜLLER, Werner, QUIEN, Norbert, *Virtuelle Steinmetzkunst der österreichischen und böhmisch-sächsischen Spätgotik*, Inhof, Petersberg, 2005.

110. MÜLLER, Werner, « Le dessin technique à l'époque gothique », in *Les bâtisseurs des cathédrales gothiques*, Editions les musées de la ville de Strasbourg, Strasbourg, 1989, pp. 237-254.

111. NAVARRO FAJARDO, Juan Carlos, *Bóvedas valencianas de crucería de los siglos XIV al XVI. Traza y montea*. Thèse doctorale, Universidad de Valencia, Facultad de Geografía e Historia, 2004.

112. NUSSBAUM, Norbert, *German Gothic Church Architecture*, London New Haven, Yale University Press, 2000.

113. NUSSBAUM, Norbert, « Space and form redefined, paradigm shifts in german architecture 1350-1550", in *La Piedra Postera.* Actas del Simposium Internacional sobre la catedral de Sevilla en el contexto del gótico final, 26 – 31 Marzo 2007, TVRRIS FORTISSIMA, Sevilla,

2007, Vol. 1, pp. 305-330.

114. NUSSBAUM, Norbert; LEPSKY, Sabine. *Das gotische Gewölbe; eine Geschichte seiner Form und Konstruktion*, Deustcher Kunstverlag, Munchen : Berlin, 1999.

115. PALACIOS GONZALO, José Carlos, "Geometric Tools in Juan De Alava's Stonecutting, Workshop", in *Nexus Network Journal* 11, Kim Williams Books, Turin , 2009, pp. 331–340.

116. PALACIOS GONZALO, José Carlos, *La canteria medieval. La construcción de la bóveda gótica española*, Ed. Munilla-Lería, Madrid, 2009.

117. PALACIOS GONZALO, José Carlos, *The gothic ribbed vaults in Rodrigo Gil de Hontañón*. Procedings of the Second International Congress on Construction History. Vol. 3, Ed. Construction History Society. Cambridge. 2006.

118. PALACIOS GONZALO, José Carlos, *Estereotomía clásica y cantería gótica en Galicia*. Santiago de Compostela. Actas II Congreso Internacional Antiguos espacios para tiempos nuevos: El material pétreo y sus fábricas en el Patrimonio. Edit: Consorcio de Santiago. Santiago de Compostela. 2005.

119. PALACIOS GONZALO, José Carlos, *Las bóvedas de crucería rebajadas : criterios de diseño y construcción*. Actas del cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 27 – 29 enero, 2005, Instituto Juan de Herrera. Madrid. 2005, pp. 821-830.

120. PALACIOS GONZALO, José Carlos, *Spanish ribbed vaults on the 15th an 16th centuries*. Proceedings of the First International Congress on Construction History, 20th-24th January 2003, Instituto Juan de Herrera. Madrid. 2003. pp. 1548-1558.

121. PALACIOS GONZALO, José Carlos, *Trazas y Cortes de Cantería en el Renacimiento Español*. Dirección General de Bellas Artes y Archivos, Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Madrid, Madrid, 1990; reedité. Munilla-Lería, Madrid, 2003.

122. PALACIOS GONZALO, José Carlos, *Las bóvedas de crucería españolas de los siglos XV y XVI*. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU, Sevilla, 2000, v. II, pp. 743-750.

123. PALACIOS GONZALO, José Carlos, *La estereotomía en las construcciones abovedadas*, Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 1999, ISBN-84-89977-93-3.

124. PÉROUSE De MONTCLOS Jean Marie, *Architecture : Vocabulaire*, Imprimerie Nationale, Paris, 1989.

125. PÉROUSE De MONTCLOS Jean Marie, *L'Architecture à la Française*, du milieu du XVe à la fin du XVIIIe siècle, Picard, Paris, 1982.

126. PINTO PUERTO, Francisco, « La falsa apariencia: las plementerias en hiladas redondas en las fábricas del Arzobispado Hispalense », in: Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla 26-28 octubre 2000, Vol. 2. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2000, pp. 827-839.

127. PINTO PUERTO, Francisco, « Transformaciones: De la línea a la superficie », Actas del *Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción,* Sevilla 26-28 octubre 2000, Vol. 2. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2000, pp. 815-826

128. RABASA DÍAZ, Enrique, "*De l'art de picapedrer (1653) de Joseph Gelabert, un manuscrito sobre estereotomía que recoge tradiciones góticas y renascentistas*", Burgos, 7-9 de junio 2007, Instituto Juan de Herrera, M. Arenillas, C. Segura, F. Bueno, S. Huerta, SEdHC, CICCP, CEHOPU, Madrid 2007, pp.745-754.

129. RABASA DÍAZ, Enrique, CASTELLANOS MIGUÉLEZ, Agustín; Centro de Los Olícios de Léon, *Guía práctica de la estereotomía de la piedra*. Centro de los Oficios de León. León. 2007.

130. RABASA DÍAZ, Enrique, *Forma y Construcción en piedra, de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX.* Akal. Madrid. 2000.

131. RABASA DÍAZ, Enrique, "Técnicas góticas y renacentistas en el trazado y la talla de las bóvedas de crucería española del siglo XVI". Actas del *Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Madrid 19-21 septiembre 1996, Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Madrid. 1996.

132. RECHT, Roland, *Les Bâtisseurs des Cathédrales Gothites*, Ed. Musées de la Villa de Strasbourg, Strasbourg, 1989.

133. RONDELET, Jean Baptiste. *Théorie et pratique de l'art de bâtir*, París, 1802-1817. Ed. facsímil Escuela de Arquitectura de Madrid; Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2001.

134. ROOSVALT, Johnny, « Ad Triangulum, Ad Quadratum », in *Gazette des Beaux-Arts*, Ser. 6, vol. 26, 1944, pp.149-162.

135. RORITZER, Matthäus, SHELBY, Lonnie Royce, SCHMUTTERMAYER, Hanns, *Gothic design techniques: the fifteenth-century design booklets of Mathes Roriczer and Hanns Schmuttermayer*. Southern Illinois University Press, Carbondale, 1977.

136. SAKAROVITCH, Jöel. *Épures d'architecture : De la coupe de pierres à la géométrie descriptive, XIV-XIX siècles*. Birkhäuser, Science Network, Basel, 1998.

137. SANABRIA, Sergio L., « Structural Sizing in the late Medieval World », in *Stable-unstable? Structural Consolidation of Ancient Buildings*, Lemaire, R. M.; Van Balen, K. Editors, Leuven University Press, Leuven, 1988, pp. 45.64.

138. SANABRIA, Sergio L., « The Mechanization of Design in the 16th Century. The Structural Formulae of Rodrigo Gil de Montañón », in *Journal of the Society of Architectural Historians*, vol. 41, n. 4, déc. 1982, pp. 281-293.

139. SANJURJO, Alberto (coord.), et al., *El Arte de la Piedra: Teoría y práctica de la cantería,* Cuadernos de Investigación de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad CEU San Pablo, nº 1, CEU Ediciones, Madrid 2009.

140. SANTAMARÍA, Ana Castro, *Juan de Alava, Arquitecto del Renacimiento*, Caja Duero, Salamanca, 2002.

141. SHELBY, Lon R., "The Geometrical Knowledge of Medieval Master Masons", in *Speculum,* Vol. 47, nº 3, Medieval Academy of America, 1972, pp. 395-421.

142. SHELBY, Lon R., “The role of the Master Mason in Medieval English building”, in *Speuculum*, Vol. 39, nº 3, Medieval Academy of America, 1964, pp. 387-430.

143. SMARS, Pierre, *Etudes sur la stabilité des arcs et voûtes, confrontation des méthodes de l'analyse limite aux voûtes gothiques du Brabant*, thèse doctorale, Leuven, Catholic University of Leuven, 2000.

144. SMARS, Pierre, De JONGE, Krista, “Geometry and Construction Techniques of Gothic Vaults in Brabant (Belgium)”, in *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, Cottbus, 20-24 de Maio 2009, pp. 671-678.

145. TALAVERANO, Rafael Martín, PÉREZ DE LOS RÍOS, Carmen, DOMÍNGUEZ, Rosa Senent, “Late German Gothic Methods of Vault Design and Their Relationships with Spanish Ribbed Vaults”, in *Nuts & Bolts of Construction History: Culture, Technology and Society*, Publisher: Picard, Editors: Robert Carvais, André Guillerme, Valérie Nègre, Joël Sakarovitch, 2012, pp.(3), 83-90.

146. TALAVERANO, Rafael Martín, « Técnicas de diseño germanas de bóvedas de crucería rebajadas”, in *Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción:* Santiago de Compostela 26-29 octobre 2011, eds. S. Huerta, I. Gil Crespo, S. García, M. Taín. Madrid, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2011, pp. 861-871.

147. THEODOSSOPOULOS, Dimitris, « Structural Design of High Gothic Vaulting Systems in England », *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, Vol. 2, 2008, pp. 1-24.

148. TORRES BALBÁS, Leopoldo, *Ars Hispaniae: historia universal del arte hispânico, Arquitectura gótica, Vol. 7,* Plus Ultra, Madrid.1952.

149. TORRES BALBÁS, Leopoldo, *Función de nervios y ojivas en las bóvedas góticas*. Investigación y Progreso, Vol. 16, Madrid. 1945, pp. 214-231

150. VIDAL, Rocio M., “Bóvedas sexpartidas: traza, estereotomía y construcción. Monasterio de Santa Maria de Huerta”, in *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción,* 21 – 24 Octubre, 2009, Universidad Politecnica de Valencia, SANTIAGO HUERTA, Fernandez, et al. (ed.), Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2009, pp. 830-831.

151. VIGNOLA, Giacomo Barozzi da, *Regras das Cinco Ordens de Architecture*, traduction de José Calheiros de Magalhães Andrade, Coimbra, Imprensa da Universidade, 1787.

152. VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Librairie, Imprimeries réunis, Paris,1854-1858. http://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_raisonné_de_l’architecture_française _du_XIe_au_XVIe_ sièclehttp://fr. (dernière visite le 15 octobre 2013).

153. VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Entretiens sur l'architecture*, Q. Morel, Paris, 1872.

154. VIOLLET-LE-DUC, Eugène Emmanuel, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Librairie, Imprimeries réunis, Paris, 1854-1858.

155. VOGÜÉ, Melchior de, NEUFVILLE, Dom Jean, BURGARA, Dom Wenceslas (ill.), *Glossaire de termes technique à l'usage des lecteurs de ´La nuit des temps´*, coll. Introduction à La nuit des temps, 2 Ed., La Pierre-Qui-Vire : Zodiaque, s.l, 1983.

156. VON SIMSON, Otto, *The Gothic Cathedral: Origins of Gothic Architecture and the Medieval Concept of Order*, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 1989.

157. WENDLAND, David, « Some Considerations on the shape of the caps of vaults » In: Proceedings of the *International Seminar on Structural analysis of historical constructions,* P.Roca, P. Lourenço, C. Modena, Padova, Leiden, Balkema, 2004, pp. 111-120.

158. WENDLAND, David, "Arches and Spirals: The Geometrical Concept of the Curvilinear Rib Vault in the Albrechtsburg at Meissen and Some Considerations on the Construction of Late Gothic Vaults with Double-Curved Ribs". in *Nuts & Bolts of Construction History: Culture, Technology and Society*, ed. by R Carvais et al., Picard, Paris, 2012, pp. 351-357.

159. WENDLAND, David, « Vaults built without formwork: Comparison of the description of a traditional technique in building manuals with the results of practical observations and experimental studies », in *Proceedings of the International Seminar on Theory and Practice about construction: knowledge, instruments, models,* Ravenna 27-29 Oct. 2005, S. 381-389. Ebenfalls http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3168/

160. WILLIS, Robert, *On the construction of the vaults of the middle ages,* Royal Institute of British Architects of London, London, 1842.

161. ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo, « El Arte de corte de piedras en la arquitectura Valenciana del cuatrocientos: un estado de la cuestión », in *Archivo de Arte Valenciano,* nº 89, Real Academia de Bellas Artes de San Carlos, Valencia 2008, pp. 333-356.

162. ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo, GÓMEZ-FERRER, Mercedees, *Pere Compte Arquitecto,* Ayuntamiento de Valencia, Consorcio de Museos de la Comunitat Valenciana, Valencia, 2007.

163. ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo. *Arquitectura gótica valenciana, siglo XIII y XV,* Generalitat Valenciana, Consellería de Cultura y Educación. Valencia. 2000.

164. ZARAGOZÁ CATALÁN, Arturo. "El arte del corte piedra en la arquitectura valenciana del cuatrocientos, Francesc Baldomar y el inicio de la estereotomía moderna", in *Actas del primer congreso de Historia del Arte Valenciano*, Mayo 1992, Conselleria de Cultura de la Generalitat Valenciana. Valencia. 1993. pp. 97-104.

Sites internet

IHRU, www.monumentos.pt (dernière visite le 30 juin 2013)

UPM, ETS de Arquitectura, www.bovedasgoticasdecruceria.com (dernière visite le 15 octobre 2013).

Rapports non publiés

BREDA, Karel, *Onderzoek van de gewelven van het Convento de Cristo, Claustro da Hospedaria*, Tomar, Portugal, Karel Breda, Architectuurbureau, rapport réalisé pour l'IPPAR en décembre 2004.

GENIN, Soraya, *Convento de Cristo, Tomar – Estudo de Patologias e Estabilidade, e Projecto de Consolidação das Abóbadas do Claustro da Hospedaria e Salas Adjacentes, Soraya Genin*, Arquitectura e Restauro, Lda., rapport réalisé pour l'IPPAR en 2006.

GENIN, Soraya, *Mosteiro dos Jerónimos, Conservação e consolidação do tecto da igreja – Relatório final*, Soraya Genin – Arquitectura e Restauro, Lda., rapport réalisé pour l'IPPAR en décembre 2003.

GENIN, Soraya, *Parecer sobre relatório de estudo de constituição das abóbadas da igreja através de sondagem com radar e métodos complementares, Soraya Genin*, Arquitectura e Restauro, Lda., rapport réalisé pour l'IPPAR en septembre 2002.

GENIN, Soraya, *Mosteiro dos Jerónimos, Projecto de conservação e consolidação do tecto da igreja – Análise dos materiais e patologias*, *Soraya Genin*, Arquitectura e Restauro, Lda., rapport réalisé pour l'IPPAR en décembre 1999.

LOURENÇO, Paulo B., *Parecer sobre a Estabilidade das Abóbadas do Claustro da Hospedaria (1º piso, alas sul e este) e antiga sala da Morgue do Convento de Cristo, Tomar*, Gabinete de Projectos Barbosa Lourenço, Lda., rapport réalisé pour l'IPPAR en 2004.

LOURENÇO, Paulo B., KRAKOWIAK, Konrad J. – *Avaliação da estabilidade da igreja do mosteiro dos Jerónimos*, Relatório 03-DEC/E-02, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, rapport réalisé pour l'IPPAR en mai 2003.

MUN, Mary. – *Estudo da constituição das abóbadas da igreja do mosteiro dos Jerónimos através de sondagem com radar e métodos complementares de diagnóstico,* Relatório nº 176/2002, LNEC, Julho 2002 (rapport non publié); OLIVEIRA, Marília.M.P. - Prospecção por radar na igreja do mosteiro dos Jerónimos, Relatório nº 177/2002 – NP, LNEC, novembre 2002

OLIVEIRA, Marília.M.P. - *Prospecção por radar na igreja do mosteiro dos Jerónimos,* Relatório nº 177/2002 – NP, LNEC, novembre 2002.

Rapport Essais avec des ultrasons dans les colonnes de l'église du monastère de Jerónimos, réalisé par le département de barrages du « Laboratório Nacional de Engenharia Civil (L. N. E. C.)», de Lisbonne en octobre 1994 (rapport non publié).

.

PUBLICATIONS DE L'AUTEUR

GENIN, Soraya, MOREIRA, Rafael y De JONGE, Krista, "As igrejas-salao portuguesas. A inovação de João de Castillo", in ALONSO RUIZ, Begoña (Ed.): *La arquitectura Tardogótica castellana entre Europa y América*. Madrid, Editorial Silex, 2011, pp. 543-553, ISBN: 978-84-7737-558-6

GENIN, Soraya, "Photogrammetry and surveying of structures and damages. Case studies". Proceedings of the III International seminar ArcHC_3D. Conservation, restoration and Rehabilitation: surveying methodologies, 31 January 2011, FAUTL, Lisbon, http://archc3d.fa.utl.pt/III_seminario/III_seminario_ArcHC_3D.html

GENIN, Soraya, DE JONGE, Krista, "Concepção e construção de abóbadas nervuradas análise geométrica e formal", in *Actas do VI Congresso Nacional de Historia de la Construcción*, Universidad Politecnica de Valencia, Instituto Juan de Herrera, pp. 881-890, 21 a 24 de Outubro de 2009. ISBN 978-84-9728-317-5.

GENIN, Soraya, DE JONGE, Krista, PALACIOS, José, "Portuguese Vaulting Systems at the Dawn of the Early Modern Period. Between Tradition and Innovation", in *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, pp. 671-678, Cottbus, 20-24 de Maio 2009. ISBN 978-3-936033-31-1.

GENIN, Soraya, DE JONGE, Krista, VAN BALEN, Koenraad, "Projecto de Conservação das Abóbadas do Claustro da Hospedaria do Convento de Cristo, *em Tomar",* in *Actas do 4º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas* (publicação digital), Universidade de Aveiro, 2008.

GENIN, Soraya, DE JONGE, Krista, MOREIRA, Rafael, "Antiga Mazagão. El Jadida (a Nova)", in *Pedra & CAL*, pp. 19-21, Gecorpa, 2008.

GENIN, Soraya, PALACIOS, José, "Les voûtes de João de Castillo au Portugal", in *Actas del Quinto Congresso Nacional de Historia de la construcción,* Burgos 2007, pp. 389-400, Instituto Juan de Herrera, Madrid 2007.

GENIN, Soraya, « Vers une évaluation des pratiques de rstauration au Portugal. Le rôle du relevé et des études dans le projet de conservation », in *Conservation in changing societies - heritage and development*, pp. 131-138, Katholieke Universiteit Leuven, 2006.

GENIN, Soraya, "Metodologia e Fases do Projecto de Conservação", in *Pedra & CAl*, pp. 34, Gecorpa, 2004.

GENIN, Soraya, "Conservação do Património Industrial – Levantamento e Projecto", in *Dealing With Ugliness – The site, the city and the region*, pp. 108-116, Universidade de Aveiro, 2005.

GENIN, Soraya, "Projecto de consolidadção do tecto da igreja do mosteiro dos Jerónimos – Estudos preliminares", in *3ºEncore – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*, pp. 653-671, LNEC, 2003.

OLIVEIRA, Marília, MUN, Mary, GENIN, Soraya, "Prospecção por radar sobre as abóbadas da igreja do mosteiro dos Jerónimos", in *3ºEncore – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*, pp. 327-354, LNEC, 2003.

GENIN, Soraya, "The Nave Vault of the Church of the Hyeronimites Monastery in Lisbon", in *Historical Constructions – Possibilities of numerical and experimental techniques,* pp. 293-302, Paulo B. Lourenço e Pere Roca, 2001.

FACULTY OF ENGINEERING SCIENCE
DEPARTMENT OF ARCHITECTURE
Research Group Architectural History & Conservation
Kasteelpark Arenberg 1, PO box 2430
B-3001 HEVERLEE, BELGIUM
tel. + 32 16 32 00800
first.name@dept.kuleuven.be
www.website.kuleuven.be