

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar –
Annaba
Faculté des Sciences de la Terre



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية علوم الأرض

Département d'architecture

قسم الهندسة المعمارية

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat En-Sciences

Spécialité : patrimoine architectural, urbain, et paysager

Par :

HAOUACHA Ferial

Thème :

Formalisation d'une méthode d'analyse stratigraphique appliquée au patrimoine architectural : cas d'étude de la Zaouia Sidi Rached à Constantine

Thèse soutenue le 24/ 06/ 2026 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Hassib REHAILIA	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	Khedidja BOUFENARA	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	/	/	/	Co-rapporteur
04	Assia SAMAI	MCA.	Université Ferhat Abbes Sétif -1-	Examineur
05	Monia BOUSNINA	MCA.	Université Ferhat Abbes Sétif -1-	Examineur
06	Redha ATTOUI	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur

صياغة منهجية للتحليل الطبقي في العمارة التراثية حالة زاوية سيدي راشد بقسنطينة

الملخص:

في مجال دراسة وصون التراث المعماري، يُعدّ مبدأ التراكم البنائي سمة متكرّرة في الأعمال التاريخية. فإلى جانب بُعد المادي، يجسّد هذا التراكم، من خلال تعقيداته المورفولوجية الظاهرة، السرد الصامت لكنه بليغ للتاريخ الزمني المتعاقب للبيئة المبنية.

ورغم هذه الأهمية الجوهرية، ما تزال القراءة الطباقية في العمارة متأثرة إلى حدّ كبير بالممارسات الأثرية، التي تختلف أسسها النظرية وأهدافها البحثية اختلافاً واضحاً عن المجال المعماري.

وفي الوقت ذاته، أدّى إدماج التقنيات المنبثقة عن الصناعة 4.0 في قطاع (العمارة، الهندسة والبناء) إلى تحوّل عميق في الأساليب والممارسات والمعارف، مما استوجب إعادة النظر في المقاربات التحليلية والعملية للأعمال المبنية.

تقترح هذه الدراسة إعادة النظر في المنهج الطبقي المعتمد في دراسة العمارة التاريخية، من خلال صياغة مقارنة مخصّصة تهدف إلى فهم وتفسير المنطق الجيني للتراكم المعماري في أبعاده الموقعية والمورفولوجية والزمنية المتعدّدة.

وقد استند هذا العمل إلى منهج متكامل يعتمد على النمذجة المفهومية للبيانات الطباقية في العمارة، أسفر عن تصميم نظام معلومات طبقي يُترجم سير العمل التحليلي للقراءة الطباقية، مع دمج الإجراءات والتقنيات والتكنولوجيات المستعملة في جميع المراحل.

أتاحت الدراسة التطبيقية المنجزة على زاوية سيدي راشد بقسنطينة تقييم مدى فاعلية هذا النهج، وأظهرت النتائج أن النظام المعلوماتي المقترح يعزز القراءة الطباقية الشمولية والمتكاملة، التي تجمع بين البيانات الموقعية والمورفولوجية والكرونولوجية.

تُسهّم هذه المقاربة في تعزيز قابلية الترابط الوظيفي لوسائل التحليل تكامل العمليات وتعدّد صيغ عرض البيانات، مما يتيح استغلالاً أمثل للبيانات وفهماً أعمق للنشأة المورفولوجية للمكوّنات المعمارية. وفي الختام، تمثل المنهجية المقترحة إطاراً نظرياً وعملياً موجهاً للباحثين والمتخصصين في مجال التراث، يتيح قراءة معمقة وتخطيطاً مدروساً للتدخلات المستقبلية في التراث المعماري.

الكلمات المفتاحية:

الطباقية المعمارية، نظام المعلومات، النموذج الرقمي، الخط الزمني، العرض متعدد الصيغ

Formalisation d'une méthode d'analyse stratigraphique appliquée au patrimoine architectural : cas d'étude de la Zaouia Sidi Rached à Constantine

Résumé :

Dans le champ de l'étude et de la conservation du patrimoine bâti, le phénomène de la stratification constructive représente une caractéristique récurrente des œuvres historiques. Au-delà de sa dimension matérielle, la stratification incarne, à travers sa complexité morphologique apparente, le récit silencieux mais éloquent de l'histoire diachronique de l'environnement bâti.

Malgré cette place essentielle, la lecture stratigraphique en architecture demeure fortement marquée par les pratiques archéologiques, dont les fondements théoriques et les finalités d'étude divergent sensiblement du champ architectural. Parallèlement, l'introduction des technologies issues de l'industrie 4.0 dans le domaine AEC —Architecture, Engineering and Construction— a profondément transformé les méthodes, les pratiques et les connaissances, conduisant à repenser les approches analytiques et opérationnelles des œuvres bâties.

La présente recherche propose de redéfinir la méthode stratigraphique appliquée à l'architecture historique et d'en proposer une démarche ad hoc, orientée vers la compréhension et l'interprétation de la logique génétique de la stratification architecturale dans sa multi-dimensionnalité spatiale, morphologique et temporelle.

Une démarche intégrée basée sur la modélisation conceptuelle des données stratigraphiques en architecture a servi de support à la conception d'un système d'information stratigraphique traduisant le flux analytique de la lecture stratigraphique et intégrant les procédures, techniques et technologies mobilisées.

L'étude expérimentale menée sur la Zaouïa Sidi Rached de Constantine a permis d'évaluer la pertinence de l'approche. Les résultats démontrent que le système d'information favorise une lecture stratigraphique holistique et intégrée, combinant données spatiales, morphologiques et chronologiques.

La démarche renforce l'interopérabilité des supports analytiques, l'interactivité des processus et la visualisation multimodale des informations, optimisant ainsi l'exploitation des données et la compréhension de la genèse morphologique des artefacts.

En définitive, la méthode proposée constitue un cadre conceptuel et opérationnel au service des chercheurs et des professionnels du patrimoine, pour une lecture approfondie visant à la planification réfléchie et fondée des interventions sur le patrimoine architectural.

Mots clés :

Stratigraphie architectural, système d'information, maquette numérique, frise chronologique, visualisation multimodale

« Formalisation of a Stratigraphic Analysis Method Applied to Architectural Heritage: A Case Study of the Zaouia Sidi Rached in Constantine»

Abstract :

In the field of study and conservation of built heritage, the phenomenon of constructive stratification represents a recurring feature of historical works. Beyond its material dimension, stratification embodies, through its apparent morphological complexity, the silent yet eloquent narrative of the diachronic history of the built environment.

Despite this essential role, stratigraphic reading in architecture remains strongly influenced by archaeological practices, whose theoretical foundations and research objectives differ significantly from those of the architectural field.

At the same time, the introduction of technologies stemming from Industry 4.0 within the AEC sector (Architecture, Engineering and Construction) has profoundly transformed methods, practices, and knowledge, leading to a rethinking of analytical and operational approaches to built heritage.

This research proposes to redefine the stratigraphic method applied to historical architecture by developing an ad hoc approach aimed at understanding and interpreting the genetic logic of architectural stratification in its spatial, morphological, and temporal multidimensionality.

An integrated approach based on the conceptual modeling of stratigraphic data in architecture has supported the design of a stratigraphic information system that translates the analytical workflow of stratigraphic reading and integrates the procedures, techniques, and technologies involved.

The experimental study conducted on the Zaouia Sidi Rached in Constantine made it possible to assess the relevance of the approach. The results show that the proposed information system promotes a holistic and integrated stratigraphic reading, combining spatial, morphological, and chronological data.

The approach enhances the interoperability of analytical supports, the interactivity of processes, and the multimodal visualization of information, thereby optimizing data exploitation and deepening the understanding of the morphological genesis of artifacts.

Ultimately, the proposed method provides a conceptual and operational framework serving researchers and heritage professionals for an in-depth reading and a reasoned planning of interventions on architectural heritage.

Keywords:

Architectural stratigraphy, information system, digital model, timeline, multimodal visualization

Remerciements

À l'issue de ce travail de recherche, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de thèse, Professeure Khadidja BOUFENARA, sans qui cette thèse n'aurait pu aboutir. Je la remercie chaleureusement pour ses orientations éclairées, la pertinence de ses conseils, sa bienveillance ainsi que pour son soutien et son encouragement constants tout au long de ce parcours.

J'adresse également mes remerciements les plus sincères à Docteur Joris RAVAGLIA pour son aide précieuse et sa contribution, notamment sur les aspects informatiques et de programmation. Mes remerciements s'étendent à l'ensemble des membres du laboratoire ICUBE de l'Université de Strasbourg, et plus particulièrement à ceux de l'équipe IGG, pour leur accueil et leur disponibilité. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance au Professeur Franck HETROY-WHEELER pour son assistance et ses échanges enrichissants.

Mes remerciements vont aussi aux membres du laboratoire MAP-CRAI de l'ENSA de Nancy, et tout particulièrement au Dr Tommy MESSAOUDI pour son accueil et son accompagnement lors d'un stage bref mais très fructueux.

Je souhaite exprimer ma gratitude aux membres du jury pour le temps et l'attention qu'ils ont consacrés à l'évaluation de ce travail. Leurs remarques constructives et leurs observations contribueront à l'enrichissement et à l'amélioration de cette thèse.

Je formule des remerciements particuliers à Rania LAGHRIB ainsi qu'à Walid BOUHELIS, pour leur accompagnement et leur contribution précieuse lors du travail de terrain.

Je souhaite également remercier ma famille pour leur patience, leur compréhension et leur soutien moral indéfectible tout au long de ces années.

Enfin, j'exprime toute ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette thèse, que ce soit par leur soutien scientifique, matériel ou moral.

Dédicace :

À la mémoire de ma chère maman, dont le souvenir m'accompagne et m'inspire chaque jour.

À mon père, le premier et le plus fidèle de mes soutiens, dont les efforts, la confiance et la présence bienveillante ont rendu ce travail possible.

À ma fille Lyna, source inépuisable d'amour et de motivation, qui me pousse chaque jour à donner le meilleur de moi-même.

À mes frères et à ma sœur, ainsi qu'à ma cousine Rania pour leur affection et leurs encouragements constants.

À mon époux, pour son aide et sa présence tout au long de ces années.

À toute ma famille, et tout particulièrement à ma tante Leila, pour leur présence bienveillante et leur soutien indéfectible.

Préambule :

Dans le cadre de ce travail, le titre initialement présenté lors de la première inscription au doctorat, « Formalisation d'une méthode d'analyse du patrimoine architectural stratifié : maisons hybrides à la vieille ville de Constantine », a été progressivement ajusté au fur et à mesure de l'avancement de la recherche.

Le titre révisé, « Formalisation d'une méthode d'analyse stratigraphique appliquée au patrimoine architectural : cas d'étude de la Zaouia Sidi Rached à Constantine », ne s'éloigne pas fondamentalement du précédent, ni sur le plan conceptuel ni sur celui de la formulation. Toutefois, il exprime plus clairement la contextualisation du travail, la définition du cas d'étude retenu en fonction des opportunités, des contraintes de faisabilité et de la pertinence scientifique des choix opérés.

Cette nouvelle formulation met davantage en valeur l'axe central de la recherche, sa finalité scientifique, ainsi que le terrain d'étude spécifique. Le choix de la Zaouia Sidi Rached s'inscrit dans la continuité de l'approche initiale centrée sur le tissu hybride de la vieille ville de Constantine, tout en répondant à des critères de faisabilité, de pertinence méthodologique et d'optimisation des connaissances produites.

Table des matières

المُلخَص :	ii
Résumé :	iii
Abstract :	iv
Remerciements	v
Dédicace :	vi
Préambule :	vii
Table des matières	viii
Liste des figures	xii
Liste des tableaux :	xvii
Liste des abréviations :	xviii
<i>Chapitre introductif</i>	1
Contexte scientifique :	2
Problématique :	7
Hypothèses :	8
Enjeux et objectifs :	9
Cas d'étude :	9
Méthodologie :	10
Structure de la thèse :	12
<i>I. Première partie : Approche thématique</i>	15
Introduction de la partie I	16
Chapitre premier : La stratification comme phénomène morphologique spatio-temporel ..	17
Introduction du chapitre.	18
1.1 L'acte de spolia : À l'origine de la stratification architecturale :	18
1.1.1 La réutilisation spontanée des œuvres du passé dans un continuuel présent : de l'antiquité au haut moyen âge.	19
1.1.2. Les matériaux hors contextes bâti et historique : le moyen âge	23
1.1.3- La Renaissance et la prise de recul envers un passé historique achevé et emblématique :	27
1.2. Artéfacts historiques et chronologie : prise de conscience envers la fréquence de la stratification dans le bâti historique.	33
1.2.1. La création des lacunes dans les œuvres du patrimoine bâti :	33

1.2.2. Les œuvres du patrimoine bâti dans leurs contextes physique et historique. :...	36
1.2.3. La conservation architecturale : de la stratification spontanée à la stratification planifiée.....	37
1.2.4. Le patrimoine bâti dans la dynamique de la mondialisation.....	45
Conclusion du chapitre premier :	48
Deuxième chapitre : La stratigraphie architecturale : une approche scientifique de la stratification du bâti historique.....	49
Introduction du chapitre :	50
2.1. La stratigraphie de déposition classique : une approche issue des sciences de la terre :	51
2.1.1. Méthodes pré-stratigraphique d'étude des structures diachroniques et multicouches :	51
2.1.2. L'approche stratigraphique d'inspiration archéologique pour le patrimoine bâti :	55
La méthode Harris pour la stratigraphie archéologique :	55
Les règles de la stratification archéologique :	58
Les éléments de lecture de la stratification :	59
Les outils de représentation, d'enregistrement et d'interprétation de la stratification :	60
La méthode Harris pour l'étude de la stratification architecturale :	67
La stratigraphie : de l'archéologie vers l'étude de l'architecture historique.....	67
Adaptation de la méthode stratigraphique de Harris au patrimoine bâti :	68
2.2. La stratigraphie assistée numériquement :	76
2.2.1. Informatisation du traitement et de la compilation du diagramme stratigraphique :	76
2.2.2. Modélisation numérique de l'information stratigraphique dans sa multi-dimensionnalité (spatio-morphologique et temporelle)	79
Conclusion du chapitre :	83
Conclusion de la partie I :	84
II. Deuxième partie : Cadre méthodologique et expérimental	89
Introduction de la partie II.....	90
Troisième chapitre : Proposition d'une méthode stratigraphique dédiée au patrimoine bâti	91
Introduction du chapitre	92
3.1. Impératifs, enjeux, et principes fondateurs d'une stratigraphie architecturale :	93
3.1.1. Divergences entre stratigraphie architecturale et stratigraphie archéologique :	93

3.1.2 : proposition d'un modèle conceptuel sous-jacent :	94
3.1.2.1: L'artéfact stratifié [Stratified Building 'SB']:.....	98
3.1.2.2 : Composantes stratigraphiques des artéfacts [Building' stratigraphic sub-entities 'Bse'] :	98
a. L'unité stratigraphique bâtie : [Stratigraphic building unit 'SBU'] :	98
b. L'Unité Chronologique [Chronological unit 'ChU'] :	99
c. Le cycle stratigraphique [Stratigraphic cycle 'SC'] :	100
d. La durée de vie des artéfacts [Artefact lifespan 'ArLs'] :	101
3.2. Présentation de l'approche développée pour la stratigraphie architecturale :	107
3.2.1. Acquisition et analyse des données stratigraphiques :	107
3.2.1.1 : collecte et acquisition des données stratigraphiques :	107
3.2.1.2 : Traitement et analyse des données pour l'identification des composantes stratigraphiques :	110
3.2.2. visualisation et représentation de la genèse stratigraphique et la séquence chronologique :	115
3.2.2.1. Représentation de la diachronicité et modélisation des intervalles temporels	115
3.2.2.2. Visualisation multimodale et multidimensionnelle de la stratification du bâti	119
Conclusion du chapitre 3 :	124
Quatrième chapitre : Étude de cas : application et évaluation de l'approche proposée	126
Introduction du chapitre :	127
4.1. Introduction du cas d'étude	128
4.1.1. Présentation de la Zaouia Sidi Rached et motivations du choix :	128
4.1.2. Description du bâtiment :	131
4.2. Application de la méthode proposée à l'étude stratigraphique de la Zaouia Sidi Rached	135
4.2.1. Mise en œuvre de la méthode :	135
4.2.1.1. Acquisition des données stratigraphiques :	136
4.2.1.2. Identification et représentation des entités stratigraphiques	140
i. Segmentation et classification supervisée via machine-learning des unités stratigraphiques du bâti :	140
i. Détection des zones de transformation :	142
ii. Identification des unités chronologiques :	146

4.2.1.3. Intégration et visualisation des résultats de la classification stratigraphique et chronologiques :	158
4.2.2. Evaluation des résultats :	163
4.2.2.1. Apport de l'approche proposée à la stratigraphie architecturale	163
4.2.2.2. Limites de la méthode et difficultés rencontrées :	167
4.2.2.3. Perspectives et pistes de recherche futures :	169
Conclusion du chapitre :	169
Conclusion de la partie II :	171
<i>Chapitre Conclusif</i>	173
Conclusion générale :	174
Bibliographie :	183
Liste des annexes	198
Annexe A : Références à la pluralité constructive et à la diachronie des œuvres du patrimoine bâti dans les chartes de l'ICOMOS	198
Annexe B : Diagrammes représentatifs des modèles conceptuels ontologiques mobilisés pour la définition du modèle stratigraphique	200
Annexe C : implémentation du logiciel de visualisation stratigraphique multimodale proposé.	202
Annexe D : Guide d'utilisation et de fonctionnement du logiciel de visualisation stratigraphique implémenté	204
Annexe E : Pipeline de reconstruction du nuage de points dense et du maillage sous Meshroom	207
Annexe F : Étapes de l'identification et de la délimitation des unités stratigraphiques du bâti par segmentation supervisée	211
Annexe G : processus de segmentation du nuage de point pierre par pierre	217
Annexe H : Extraits d'archives relatifs à l'état des lieux du quartier Sidi Rached lors de la construction du pont Sidi Rached	219
Annexe I : Inventaire des établissements religieux de Constantine établie par L. Feraud d'après des archives datant de l'époque de Salah Bey 1776	221

Liste des figures

Figure 1: approche méthodologique et infrastructure du système d'information proposé. Sources : auteure	11
Figure 2: arc de triomphe de Constantin. A gauche : sculpture de l'arc d'Hadrien, à droite : sculpture réalisée pour l'arc de triomphe de Constantin.	20
Figure 3: Histoire constructive de la mosquée de Cordoue de l'antiquité au XIVème siècle..	21
Figure 4 : la façade principale de la basilique Saint-Marc surmontée des statues de cheveux en bronze envoyé de Constantinople par le Doge Enrico Dandolo.	25
Figure 5 : les “Pilastri acritani” à la place Saint-Marc de Venise.	25
Figure 6 : spolia dans les vestiges du caravansérail Obruk Han avant sa rénovation. Sources : Eravşar, O. 2016.....	26
Figure 7: Palais Mattei Di Giove. En haut : façades introverties du premier patio. En bas: loggia au première étage donnant sur le patio.....	28
Figure 8: Casa di Lorenzo Manlio . En haut : Façades de la maison. En Bas : détail des bas- reliefs et de l'inscription contemporaine.	29
Figure 9: Hagia sophia comme bâtiment spolié (basé sur des reconstitutions).	31
Figure 10: les différents types de réutilisation des œuvres du passée jusqu'à l'époque ottomane à Hagia Sophia.....	32
Figure 11: Le Parthénon lors de la guerre de Morée 1687.....	34
Figure 12: relevé de l'élévation nord du Parthénon effectué par Alexis Paccard en 1845.	34
Figure 13: vue Sud-Ouest de la basilique Sainte-Marie Madeleine de Vezelay.....	39
Figure 14: vue Nord-Est de la basilique sainte-Marie Madeleine de Vezelay.....	40
Figure 15: La façade Ouest de la basilique avant et après la restauration. A gauche : Relevé de la façade Ouest avant la restauration. A droite : Vue de la façade Ouest après restauration. ..	41
Figure 16: La façade Sud de la basilique avant et après la restauration. En haut : Relevé de la façade Sud avant les travaux du XIXe S. En bas : Vue de la façade Sud après la restauration.	42

Figure 17: restauration de la partie Sud-Ouest du Colisée par Stern en 1807.	44
Figure 18: Restauration de la partie Nord-Est du Colisée par Valadier en 1823.	45
Figure 19: les différents paliers d'occupation du site d'Hissarlik, avec la reconstitution hypothétique de la Troie d'Homère.	53
Figure 20: Recoupement de la recherche documentaire philologique et de l'exploration des vestiges in-situ. En haut : croquis de l'élévation sud du pont sur le ravin et des inscriptions relevées.	54
Figure 21: Méthode de fouille et de lecture stratigraphique verticale. Système Wheeler-Kenyon.	56
Figure 22: Méthode de fouille et de lecture stratigraphique horizontale en aire ouverte.	57
Figure 23: Un plan de contexte unique.	61
Figure 24: Une section verticale ou coupe de référence.	62
Figure 25: Exemple d'une fiche d'enregistrement des unités/ contextes stratigraphiques.	63
Figure 26: Etapes de la construction du diagramme séquentiel « Harris matrix ».....	65
Figure 27: Schéma synthétique de la méthode stratigraphique archéologique de Harris.	66
Figure 28: Stratification multidirectionnel : différentes interventions sur le colisée.	70
Figure 29: Transcription des unités stratigraphiques sur relevé architectural.	74
Figure 30: exemple d'une matrice d'Harris pour l'étude de la stratigraphie architecturale. ...	76
Figure 31: les matrices d'Harris générées par différents outils de gestion des données stratigraphiques.	79
Figure 32: représentation d'un extrait du modèle conceptuel CIDOC-CRM.	95
Figure 33: Différents cycles stratigraphiques du pont El Kantara de Constantine	101
Figure 34: Modèle conceptuel de données proposé pour la stratigraphie architecturale.	106

Figure 35: Différents types de modèles 3D : A : nuage de point, B : maillage, C : modèle voxelisé, D : modèle paramétrique.....	108
Figure 36: Procédure Scan-to-BIM : A : capture des données via Scanner laser, B : nuage de point généré, C : modélisation des familles paramétriques, D : modèle paramétrique.....	109
Figure 37: Reconstruction photogrammétrique. A : calcul des positions des images, B : génération d'un maillage, C : projection de la texture.	110
Figure 38: Segmentation par croissance des régions autour d'un point de référence (pixel semence).....	112
Figure 39: Méthode de segmentation automatique pierre à pierre.	114
Figure 40: Modèle chronologique de Dudek et Blaise pour la lecture des transformations des artefacts patrimoniaux au cours de leur cycle de vie	116
Figure 41: modèle chronologique de C. Stefani pour la représentation des transformations diachroniques du bâti historique à différentes granularités.....	117
Figure 42: Frise chronologique séquentielle pour la représentation de la stratigraphie architecturale.	119
Figure 43: Annotation sémantique sur modèle 3D. a : altérations ; b : élément architectonique ; c : mise en œuvre, d : type de matériaux.....	120
Figure 44: L'interface graphique de l'application de visualisation du projet CH2T.....	121
Figure 45: L'architecture du logiciel proposé : les classes et leurs attributs.....	123
Figure 46: Interface graphique du logiciel proposé.	124
Figure 47: Infrastructure et fonctionnalités du système d'information dédié à la stratigraphie architecturale.	125
Figure 48: Emplacement du cas d'étude dominant l'entrée des gorges de Oued el Rhumel.	128
Figure 49: Carte de Constantine de 1895 illustrant l'emplacement de la Zaouia Sidi Rached dans son environnement immédiat.....	129
Figure 50: Coupe topographique localisant la Zaouïa sur le rocher historique de Constantine —réalisée avec QGIS.	130

Figure 51: Espaces intérieurs et détails architectoniques et décoratifs de la zaouïa.	133
Figure 52: Organisation des espaces de la Zaouia Sidi Rached. a : plan d'ensemble de la Zaouia Sidi Rached, b : distribution spatio-fonctionnelle.....	134
Figure 53: Ancien dossier Graphique de la Zaouia Sidi Rached. a : plan, b : élévation Sud, c : élévation Est	135
Figure 54: Positions de prises des photographies pour la reconstruction du modèle 3D. à gauche : photo aérienne du site (Google Earth pro), à droite : calcul des positions des cameras (Meshroom).....	137
Figure 55: a, b Nuage de points généré par Colmap. a : vue Sud-Ouest. b : vue Sud-Est. c : interpolation des lacunes par un maillage, d : conversion en nuage de points dense.....	138
Figure 56: Les modèles 3D générés. a : nuage de point dense, b : maillage.....	139
Figure 57: Flux du processus de segmentation/classification via machine learning pour la définition des SBUs. a : simplification de la géométrie et dépliage, b : segmentation/classification supervisée, c : cartographie des calques de classes	144
Figure 58: Cartographie de la distribution des matériaux dans les unités stratigraphiques du bâti.....	145
Figure 59: Repérage des zones de transformation à partir de l'inspection des joints de mortier	145
Figure 60: La Zaouia Sidi Rached à l'époque coloniale Française : a- l'édifice avant 1907, b- l'édifice entre 1907 et 1912, c- l'édifice après 1915	149
Figure 61: Projection de l'unité chronologique [ChU_I] (intervention coloniale postérieure à 1915) sur le nuage de points — segmentation selon la valeur du champ scalaire	150
Figure 62: l'unité Chronologique [ChU_II] correspondant à l'ancien Rempart de la cité romaine.....	151
Figure 63: Identification des fragments du rempart décrit par Léon l'africain	152
Figure 64: Identification des vestiges du Rempart de la cité antique romaine correspondant à l'unité chronologique identifié comme appartenant à l'époque romaine.....	154
Figure 65: a : Tracé de l'unité chronologique [ChU_III], b : Unités stratigraphiques bâties appartenant à l'entité temporelle [ChU_III]	155

Figure 66: Identification des fragments du mur ‘hybride’ correspondant au rempart identifié par l’unité chronologique [ChU_III]. * fragment du rempart avec meurtrières.....	157
Figure 67: Interface graphique du logiciel créé pour la visualisation stratigraphique. a : informations générales du site, b : instances des unités stratigraphiques du bâti, c : instances des unités chronologiques	161
Figure 68: Différents modes d’affichage des informations stratigraphiques. a : Par texture des matériaux de construction, b : par calques d’unités stratigraphiques du bâti, c : par calques d’unités chronologiques	162
Figure 69: Visualisation interactive de l’évolution morphologique à travers la navigation chronologique. a : cycle stratigraphique avant la construction du pont, b : cycle stratigraphique après la construction du pont.....	163
Figure 70: Organisation spatiale des unités chronologiques.....	166
Figure 71: Gros plan sur les unités stratigraphiques du bâti associées à l’unité chronologique [ChU I] ‘Intervention française’ [1900-1930].....	167
Figure 72: Occlusions causées par la présence de végétation et de lichens.....	168
Figure 73: Aperçu des apports innovants du système d’information stratigraphique proposé.	179
Figure 74: Schéma de synthèse des apports de la méthode proposée à la lecture stratigraphique du bâti.....	181

Liste des tableaux :

Tableau 1: structure de la thèse	13
Tableau 2: Écarts entre la méthode de Harris et les exigences méthodologiques propres à l'étude de la stratigraphie architecturale.	86
Tableau 3: Exemples de classes et propriétés de l'ontologie CIDOC-CRM et ses extensions	96
Tableau 4: Classes externes référencées par le modèle conceptuel proposé.....	97
Tableau 5: Organisation hiérarchique des classes du modèle conceptuel proposé	103
Tableau 6: Extrait du fichier ASCII présentant les attributs d'une unité stratigraphique bâtie du nuage de points.....	159

Liste des abréviations :

AEC : Architecture, Engineering and Construction

TIC: Technologies de l'Information et de la Communication.

InfoVis : visualisation de l'information.

ICOMOS : Conseil international des monuments et des sites.

ICOM : Conseil international des musées.

CIDOC-CRM : Comité international pour la documentation– Modèle de référence conceptuel

CRM-sci : Extension du modèle de référence CIDOC pour l'observation scientifique.

CRM-ba : Extension du modèle de référence CIDOC pour l'archéologie du bâti

CRM-archaeo : Extension du modèle de référence CIDOC pour l'archéologie

BSE : Composantes stratigraphiques des artefacts « Building stratigraphic sub-Entities ».

SB: L'artéfact stratifié « Stratified Building »

SBU : L'unité stratigraphique bâtie « Stratigraphic Building Unit »

ChU : Unité Chronologique « Chronological Unit »

SC : Cycle Stratigraphique « Stratigraphic Cycle »

ArLs : Durée de vie des artefacts « ARtefact LifeSpan »

Chapitre introductif

Contexte scientifique :

L'intérêt porté au patrimoine architectural, à son étude ainsi qu'à sa conservation, a mis en évidence l'omniprésence du caractère stratigraphique du bâti historique. Les acteurs de la conservation du patrimoine se sont souvent heurtés à la morphologie complexe de ces œuvres, qui s'avère être parfois irréversible. Viollet Le Duc a affirmé à ce propos qu' : «...*Il est peu d'édifices qui [...] aient été bâtis d'un seul jet* » soulignant la succession des phases de construction et d'interruption qui caractérisent les grands chantiers monumentaux, notamment ceux de l'époque médiévale. Il étend ensuite sa réflexion aux édifices plus modestes, en précisant que « *s'ils l'ont été, qui n'aient subi des modifications notables* » (Viollet-le-Duc 1854).

La stratification, dans sa configuration particulière, résulte souvent de superposition, de juxtaposition et d'imbrication d'éléments constructifs hétérogènes. Elle peut, à première vue, paraître aléatoire et dénuée de cohérence ou de règles structurantes. Toutefois, une observation attentive et rigoureuse des volumes et des surfaces, permet de dévoiler une logique de composition intelligible. En effet, cette conformation constitue l'expression matérielle d'une histoire morphologique diachronique, à la fois riche, complexe et en constante évolution. Les principes qui sous-tendent sa genèse, s'apparentent aux règles de composition architecturale : à partir d'une forme initiale, celle-ci évolue par l'application d'un ensemble limité d'opérations de transformation — ajouts, retraits, déformations partielles — qui façonnent progressivement la morphologie des artefacts. Ces transformations, planifiées soient elles ou conditionnées par des facteurs sociétaux, environnementaux, techniques, ou encore économiques, participent à la construction progressive de cette forme complexe perceptible dans la masse du bâti historique, et représentative des modes d'usage, des besoins et des dynamiques d'évolution des sociétés et des espaces.

La stratification architecturale se manifeste à différentes échelles et sous formes multiples.

À l'échelle du bâtiment, elle se traduit par l'assemblage d'éléments, de volumes et de matériaux hétérogènes coexistant au sein d'un même espace. Elle peut également prendre la forme d'une juxtaposition de langages stylistiques et ornementaux distincts, ou d'une hybridation de techniques constructives et de systèmes structurels appartenant à des périodes de progrès technologiques différentes.

À une échelle plus large, celle du tissu urbain, la stratification se révèle à travers l'accumulation d'aménagements successifs, la superposition d'organisations spatiales divergentes ou encore la coexistence de trames et de infrastructures urbaines issues de temporalités variées.

Le phénomène de la stratification représente dès lors une réalité morphologique indéniable, caractérisant les œuvres patrimoniales. Cette manifestation tangible a façonné l'environnement bâti historique et continue de l'imprégner au fil de son existence. Elle matérialise le processus génétique et évolutif des lieux, révélant les transformations successives qu'ils ont subies.

La prise en compte de cette stratification, soulève de nombreux enjeux essentiels à la conservation et valorisation des œuvres et des espaces, tant dans leur dimension matérielle que sémantique.

D'un point de vue social, la stratification reflète un passé commun et une mémoire collective multiculturelle. Elle passe en revue les occupations successives des lieux, marquées par des pratiques architecturales, des usages et des organisations spatiales, des savoir-faire et des influences artistiques et techniques diverses et variées qui ont marqué les sociétés, tant sur le plan culturel et spirituel, qu'économique et technologique. Chaque époque y a laissé son empreinte à travers des mutations de l'espace et du bâti, subtilement ancrées dans le paysage. Cette richesse culturelle et identitaire, constitue actuellement un levier économique stratégique, participant à la dynamisation des ressources des pays, à travers le développement du tourisme culturel, la promotion des formes de créations populaires locales, et l'ouverture au monde dans son cosmopolitisme.

Sur un plan cognitif, la stratification est l'incarnation de leçons architecturales et constructives, mettant en lumière divers scénarios d'expressions artistiques, d'intégrations contextuelles et de réappropriation des espaces à travers le temps. Elle permet de révéler les modes d'agencement, de structuration et de conception des espaces, ainsi que les ressources matérielles, techniques, et humaines mobilisées dans la construction. Par ailleurs, elle témoigne des capacités économiques, technologiques et de gestion, propres aux sociétés et aux usagers des périodes étudiées, offrant ainsi une lecture fine des conditions et des modalités de leur production architecturale et urbaine.

Dans le même contexte, l'artéfact stratifié représente un document historique authentique, portant les traces d'événements historiques successives et d'une évolution temporelle et chronologique figée dans l'espace, retraçant la dynamique des peuples et des civilisations à travers le temps. Les transformations formelles, spatiales et structurelles gravées sur les surfaces du bâti, et dans l'agencement des espaces, représentent le récit discret retranscrivant des faits marquant les transitions, les mutations et les évolutions qui ont jalonné l'histoire des villes et des sociétés. Ce récit, inscrit dans la matérialité des œuvres, se distingue par son

objectivité et sa fiabilité car dépourvu du style du narrateur et de la subjectivité de l'auteur. En ce sens, la stratification architecturale se fait témoignage pure, muet mais éloquent de la continuité et des bouleversements historiques.

De par son importance et de la place prépondérante qu'il occupe en patrimoine bâti, le phénomène morphologique de la stratification, a fait écho dans les débats autour de la nature et de l'importance de l'intervention sur l'ancien. En effet, lors de la rencontre scientifique autour des monuments historiques organisée en 1964 à Venise, la question sur la genèse diachronique du bâti a été soulevée et il y fut affirmé que : « *les apports de toutes les époques ... d'un monument doivent être respectés...* » (ICOMOS 1964). Cette préoccupation récurrente a fortement marqué le discours scientifique, intellectuel et théorique autour du patrimoine bâti, et de sa conservation. En effet, les œuvres du patrimoine bâti sont définies par leur bipolarité artistique et historique, cette dernière dimension étant à l'origine même de l'intérêt porté aux œuvres, à leur signification et à leurs reconnaissance en tant qu'objets symboliques, dignes de considération et de grandeur.

D'autre part, sur un plan purement pragmatique, la stratification constitue une caractéristique intégrante et structurante, ayant un impact direct et avéré sur le comportement structurel, l'aspect figuratif et les valeurs mémorielles et identitaires des œuvres patrimoniales. Ceci a mené à la nécessité de mettre en place une approche méthodologique et scientifique à la lecture de ce phénomène morphologique, aussi bien dans la phase d'étude et de documentation des œuvres, que durant la phase opérationnelle de conservation.

D'origine géologique, la stratigraphie est la science qui étudie la stratification des formations terrestres. Elle a été développée afin de décrypter et de comprendre cette organisation complexe, en y identifiant les principales composantes élémentaires, ainsi que les rapports entre elles.

L'étude stratigraphique a été adoptée par la suite en archéologie comme méthode d'enregistrement et d'organisation du travail d'excavation et de fouilles sur site. Elle fut mise en place au XXe siècle et structurée autour de principes fondateurs, inspirés de la paléontologie et de la stratigraphie sédimentaire.

Initialement appliquée à l'examen des établissements humains préhistoriques, cette méthode permettait de reconstituer la séquence d'enfouissement et de datation des vestiges anciens. Cette vision a ensuite été étendue à l'étude des civilisations protohistoriques, offrant un cadre méthodologique rigoureux pour l'exploration et la datation des vestiges matériels. L'introduction de la lecture stratigraphique en aires ouvertes a par ailleurs permis d'affiner la compréhension des dynamiques d'évolution des sites archéologiques, et les processus de succession des traces humaines au fil du temps.

Avec l'essor de l'archéologie du bâti, l'intérêt s'est progressivement déplacé des positions des couches sédimentaires vers les structures architecturales elles-mêmes. La stratification n'est plus perçue uniquement comme un phénomène de dépôt sédimentaire comportant des éléments artéfactuels, mais également comme un processus spatio-temporel inscrit dans la matérialité même du bâti. Cette transposition du raisonnement stratigraphique à l'échelle des édifices a souligné la nécessité d'une prise en compte spécifique de la stratification architecturale, comme phénomène morphologique spécifique aux œuvres du patrimoine bâti, nécessitant lecture approfondie et méthodique.

A partir des années 1980, l'approche archéologique fut ainsi transférée dans le domaine du patrimoine bâti par les acteurs de la restauration architecturale, et ce en dépit des divergences pouvant exister entre les deux champs disciplinaires. En effet, là où la stratigraphie archéologique est un acte destructif ayant pour objectif la découverte et la mise en lumière des formes d'installations anthropiques et de leurs organisations sociales et culturelles, la stratigraphie architecturale est une étude non-invasive, visant la documentation et la compréhension de la morphogénèse des productions bâties.

Ce transfert méthodologique a cependant mis en évidence, avec l'expérience, les limites d'une transposition directe de l'approche archéologique au domaine architectural. Il a notamment révélé l'écart conceptuel et opérationnel entre la notion de stratification en archéologie et celle propre à l'architecture. En effet, dans le bâti, la stratification ne répond pas aux principes de déposition gravitaire ni d'assise et de continuité horizontales, fondamentaux en stratigraphie archéologique.

De plus, la matrice de Harris, conçue en archéologie pour l'enregistrement et l'organisation de du processus de formation stratigraphique des sites, ne permet d'établir qu'une séquence fondée sur la chronologie relative des unités stratigraphiques. Or, dans l'architecture historique, il est indispensable de déterminer une chronologie quantifiée entre ces unités, inscrite dans le temps

historique, pour appréhender la logique morphogénétique, comprendre les différents contextes de transformation et analyser les interactions réciproques entre les strates constitutives de l'édifice.

Par ailleurs, l'essor des outils de numérisation et des TIC a profondément transformé les méthodologies, les applications ainsi que les approches scientifiques et analytiques de l'architecture, et des œuvres historiques plus spécifiquement.

En effet, le développement des techniques de capture de la réalité, a entraîné le passage de l'inspection in situ, vers un environnement de travail numérique plus accessible, manipulable et contrôlable. Cette mutation a ouvert la voie à de nouvelles pratiques, élargissant significativement les perspectives d'analyse, d'interprétation, de partage et de valorisation du patrimoine bâti. Elle permet une exploitation optimale des données, favorisant ainsi la production de connaissances nouvelles et inédites.

Dans ce contexte, il devient essentiel de reconsidérer la pratique actuelle de la stratigraphie architecturale à la lumière des avancées technologiques et scientifiques récentes. Le vaste éventail de possibilités, offert par les outils contemporains de visualisation, de traitement, de simulation et d'expérimentation, notamment à travers les maquettes numériques, met en évidence la nécessité de revisiter et d'actualiser les méthodes en usage. C'est dans cette dynamique de réflexion, d'évaluation et de renouvellement du cadre méthodologique appliqué à la stratigraphie en architecture historique que s'inscrit le présent travail de recherche. Il vise à établir un état des lieux critique, à en évaluer les potentialités actuelles et à explorer les nouvelles perspectives et potentialités possibles.

À la lumière des défis méthodologiques soulevés —notamment le besoin de réadapter et de réapproprier la méthode stratigraphique à l'étude du bâti, ainsi que la nécessité de moderniser les outils d'analyse à l'ère de l'industrie 4.0— la vieille ville de Constantine constitue un terrain d'observation particulièrement pertinent. Riche de strates historiques et constructives, cette cité pluriséculaire illustre, par la complexité de son tissu urbain, les processus continus de transformation et d'adaptation de l'espace bâti. Classée en secteur sauvegardé national (République Algérienne Démocratique et Populaire 2005), la vieille ville de Constantine se caractérise par un tissu hybride, dense et sinueux, ponctué d'ouvertures, de régularités et d'alignements, témoignant des interventions successives qui ont modelé sa morphologie.

L'analyse attentive des masses bâties révèle un véritable palimpseste architectural, où chaque strate s'inscrit dans le long processus de l'histoire diachronique de la ville. Cette richesse fait de Constantine un terrain d'étude privilégié pour aborder la question de la stratification architecturale et explorer de nouvelles approches d'analyse et de représentation adaptées au patrimoine bâti.

Dans cette perspective, se dévoile au premier plan de la silhouette dense et dynamique de la vieille ville de Constantine, la Zaouia Sidi Rached, perçue depuis la rive orientale du rocher historique. Elle est marquée à la fois par la verticalité de son minaret et par la présence monumentale du pont éponyme qui la surplombe.

Véritable repère architectural et historique, la zaouïa constitue, à l'échelle de l'édifice, un échantillon exemplaire de l'histoire diachronique et complexe de la ville. Par sa morphologie, elle expose une stratification architecturale expressive, portant dans ces interfaces les différentes phases d'édification, de transformation et d'adaptation, révélatrice d'un long processus morphogénétique spatio-temporel.

Problématique :

L'introduction de l'analyse stratigraphique aux œuvres du patrimoine bâti fût le résultat de débats controversés autour des travaux de conservation, mettant en avant le caractère synchronique des vestiges au détriment de leur histoire diachronique en quête d'une certaine expression stylistique ou dans le but de mettre en avant une phase considérée comme jalon de l'identité collective. La méthode Harris pour l'étude stratigraphique représentant l'état de l'art de la stratigraphie archéologique a été consensuellement adaptée au domaine de l'architecture historique pour l'étude du bâti stratifié.

Notre travail précédemment menée à ce sujet (HAOUACHA 2015), nous a permis de soulever des incohérences de la méthode Harris -conçue principalement comme approche destructrice d'enregistrement du travail de fouilles- à l'étude du patrimoine bâti. Il a été constaté que les artefacts diachroniques dans leur complexité morphologique et la multiplicité des interventions stylistiques et techniques apportées tout au long de leur cycle de vie présentaient des rapports spatiaux en contradiction avec «...*la pensée du temps entassé en profondeur de la géologie et de l'archéologie*» (HAOUACHA 2015); ce qui ne correspond nullement aux quatre lois de la stratigraphie archéologique, fondements de la méthode Harris (Harris 1989).

Ajouté à ceci, les outils d'identification et de représentation de l'ordre stratigraphique topologique et chronologique de la méthode susmentionnée —à savoir, l'enregistrement des contextes uniques en fiches et sections bidimensionnelle pour le premier, et le diagramme d'Harris pour le second— ne répondent pas aux objectifs de l'étude de la stratification du bâti. En effet, la stratigraphie architecturale tend à appréhender la morphogénèse des constructions dans leurs tridimensionnalité et leur complexité morphologique d'une part et à décrire le processus de permanences/ transformation sous-jacents (Dudek et Blaise 2010) d'autre part, afin d'identifier les valeurs et les faiblesses et d'assurer la compréhension, la conservation et la transmission des biens patrimoniaux.

Partant de ce postulat et du besoin de la lecture pluridisciplinaire que requiert l'étude de la stratification architecturale, le présent travail tentera de répondre aux questions suivantes :

Est-ce que la méthode de lecture stratigraphique d'Harris, conçue initialement à des fins de fouilles archéologiques et basée sur des principes d'inspiration géologique, peut-elle être employée, pertinemment, pour l'étude des œuvres du patrimoine bâti ?

Quelles sont les concepts et les règles qui sous-tendent la stratification architecturale ?

Quelle serait l'approche méthodologique la plus appropriée pour l'étude et la représentation de la multi-dimensionnalité spatio-morphologique, chronologique et sémantique de la stratification du patrimoine bâti ?

Hypothèses :

Afin de pouvoir mener à bien, ce travail de recherche et de répondre aux questionnements avancés ci-dessus, nous émettons les hypothèses suivantes :

- Bien que les œuvres bâties constituent un objet d'étude commun aux deux disciplines —patrimoine architectural et archéologie— et malgré le développement de l'archéologie du bâti, les objectifs et les finalités de la lecture stratigraphique archéologique, ainsi que ses principes fondamentaux, demeurent peu compatibles avec l'étude architecturale, laquelle exige une approche méthodologique spécifiquement et exclusivement orientée vers l'analyse des productions bâties.

- La définition d'un modèle conceptuel de données spécifiques au domaine de la stratigraphie architecturale, permettrait d'en définir la portée et d'identifier les éléments, les

principes et les règles définissant le cadre méthodologique pour l'étude de la stratification du bâti.

- Enfin, l'exploitation des potentialités des technologies de la géomatique et de l'InfoVis permettrait d'assurer l'interopérabilité et l'intégration des différents types de données impliqués dans l'étude stratigraphique, afin de garantir un traitement optimal des différentes dimensions spatio-morphologique, et chronologique.

Enjeux et objectifs :

Partant de la problématique soulevée plus haut, le principal objectif du présent travail de recherche est l'élaboration d'une méthode de lecture stratigraphique ad-hoc au patrimoine bâti. Ainsi, nous visons à traiter la stratification architecturale dans sa multi-dimensionnalité spatio-temporel et morphologique en mettant en avant les points suivants :

- Souligner l'incompatibilité et les incohérences de la méthode Harris pour l'étude de la stratification architecturale.
- Mettre au point une méthode d'analyse, de traitement et d'interprétation des données stratigraphiques, pour la lecture de la morphogénèse des œuvres et la compréhension des mutations spatiales et structurelles tout au long de leur cycle de vie.
- Assurer l'intégration des différents types de données impliquées dans l'étude au sein du même espace et/ ou support de travail, pour une lecture holistique et complète de la stratification
- Assurer la bonne gestion des informations dans leur hétérogénéité et leur abondance

Cas d'étude :

Afin d'explorer les pistes avancées dans nos hypothèses et d'évaluer les résultats de l'utilisation d'une méthode de lecture stratigraphique spécialement élaborée pour le bâti historique, notre choix s'est porté sur la Zaouia Sidi-Rached de Constantine comme terrain d'expérimentation et de validation de l'approche proposée dans ce travail.

Cette structure religieuse, à la lisière du rocher d'assise du centre historique de Constantine, est érigée sur les ruines de la muraille antique de Cirta. Etant donné sa situation à la limite inférieure de la cité à la rive des gorges du Rhumel et son emplacement adjacent aux divers accès et points de liaison de la vieille ville, cet édifice a subi plusieurs transformations tout au long de son existence; en témoigne la complexité de sa morphologie et la diversité du langage stylistique et architectonique le caractérisant.

La forte stratification apparente sur ses différentes façades, sa position au sein d'un secteur sauvegardé (République Algérienne Démocratique et Populaire 2005) et le manque de documentation retraçant son histoire constructive, sont autant d'éléments ayant motivé sa sélection comme cas d'étude pour notre recherche. En effet, le travail d'analyse stratigraphique que nous effectuerons sur la présente loge soufie nous permettrait, d'une part, d'évaluer les apports de l'approche proposée ainsi que les perspectives à considérer d'un point de vue méthodologique et d'autre part, de contribuer à la documentation du processus génératif de la stratification et à l'orientation des futurs travaux de conservation du bâtiment, en mettant en lumière la logique morphologique et structurelle sous-jacente de cette bâtisse.

Méthodologie :

Compte tenu de l'objectif principal de cette recherche — à savoir la proposition d'une méthode d'analyse stratigraphique '*ad-hoc*' adaptée à l'architecture historique — un travail épistémologique préalable s'impose. Celui-ci consiste à retracer les origines de la stratification en tant que phénomène matériel, à réaliser une revue de la littérature et à examiner les différentes méthodes stratigraphiques existantes. Cette démarche permet, dans un premier temps, de définir un modèle conceptuel de données mettant en exergue les concepts fondamentaux impliqués dans l'étude de la stratification du bâti historique, leurs significations, ainsi que les relations et interactions qui régissent leur fonctionnement.

Ensuite, la volonté de la mise en corrélation des données spatio-morphologiques et chronologiques à travers notre méthode, nous mène à l'adoption d'une approche méréologique multi-niveaux, où on s'intéressera principalement à trois volets :

- Le niveau spatial : visant à appréhender la distribution des différentes unités stratigraphiques et temporelles dans l'espace et d'en saisir la logique de positionnement et de succession dans l'ensemble. Ceci est réalisé en ayant recours à l'acquisition des données spatiales, via un processus de reconstruction photogrammétrique, permettant de générer et de manipuler le jumeau numérique du cas d'étude sous forme de nuage de points dense et/ ou de maillage.
- Le niveau chronologique et temporel : visant d'une part à retracer le processus d'évolution historique en identifiant les permanences, les moments clés de transformation et les durées de chaque phase caractéristique, et d'autre part à pouvoir visualiser spatialement l'organisation chronologique et la genèse stratigraphique tout au long du cycle de vie de l'artefact étudié. Pour ceci, on se base principalement, sur une recherche bibliographique

historique et archivistique approfondie, soutenue par une investigation typo-chronologique. Les données collectées feront par la suite l'objet d'une spatialisation/ schématisation via annotation 3D de la maquette numérique préalablement acquise.

- Le niveau morphologique : permet de lire la composition de l'œuvre, de comprendre les rapports topologiques et formels réciproques entre les unités stratigraphiques et d'en saisir les causalités. Ceci est réalisé en ayant recours aux techniques de segmentation et de classification 3D, permettant de mettre au point des cartographies thématiques des différentes entités stratigraphiques identifiées.

Vu l'étendue des champs d'expertise sollicités et la variété d'outils utilisés, la proposition d'un système d'information stratigraphique nous permet d'organiser le flux de travail et de structurer les données, les outils et les processus mobilisés dans un environnement commun. Le système d'information en question est doté d'une interface de visualisation des entités stratigraphiques implémentée sur la base du modèle conceptuel de données définie, afin de pouvoir faire la synthèse des résultats produits sur la base des trois niveaux analytiques.

(Figure 1) permet d'appréhender la méthodologie globale et l'architecture du système d'information stratigraphique proposé.

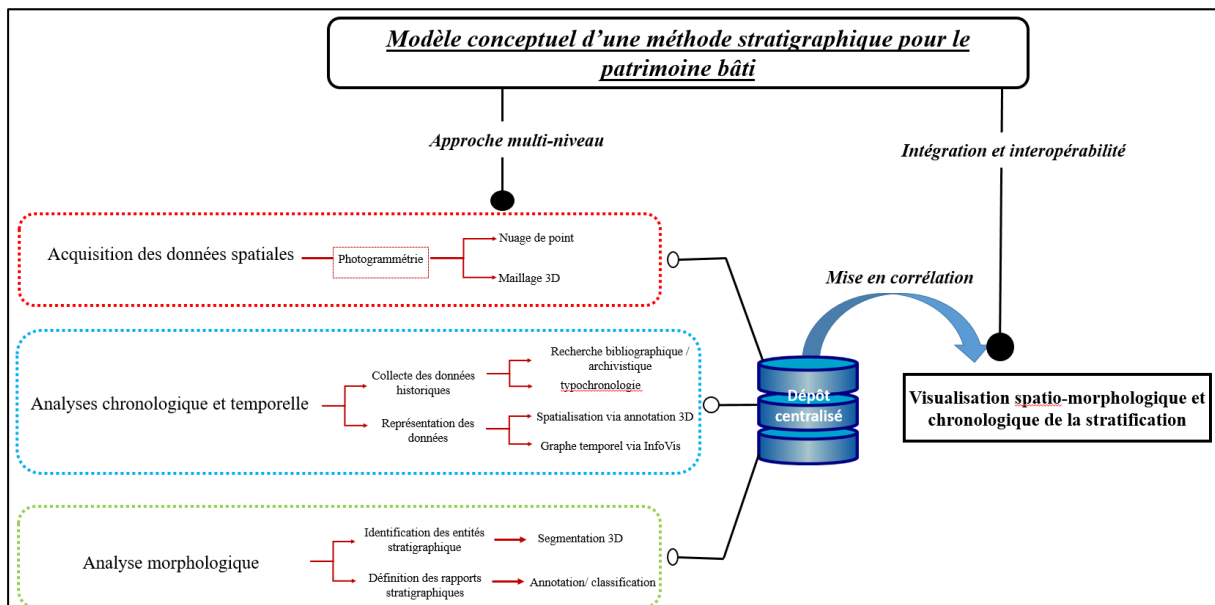


Figure 1: approche méthodologique et infrastructure du système d'information proposé.
Sources : auteure

Structure de la thèse :

Après un chapitre introductif présentant le contexte d'étude, la problématique abordée, les objectifs ainsi que l'étendue du présent travail, la thèse s'articule en deux grandes parties complémentaires.

La première, fondée sur l'analyse de l'existant, vise à explorer et à synthétiser l'état des connaissances, les approches et les méthodes développées dans le domaine d'étude.

La seconde, de nature contributive, propose une approche méthodologique renouvelée, élaborée à partir des constats, besoins et limites identifiés dans la première partie, tout en répondant aux objectifs fixés dans le cadre de cette recherche.

Ainsi, la première partie comprenant l'approche théorique et conceptuelle permet la contextualisation et la délimitation du cadre de la recherche. Elle est constituée à son tour de deux chapitres. Le premier chapitre est consacré à la compréhension de la stratification comme phénomène multidimensionnelle omniprésent dans les œuvres du patrimoine bâti, son origine, ses formes et la position qu'il occupe dans la pensée, le discours scientifique et intellectuel et la pratique du patrimoine bâti. Ceci nous permet en un premier temps, de définir les concepts impliqués, l'intérêt du phénomène dans le champ d'expertise et les besoins en matière de connaissance et de pratique.

Par la suite, le second chapitre est consacré à la stratigraphie comme méthode d'étude et d'interprétation de la stratification. On y aborde les différentes méthodes utilisées, leurs avantages, leurs limites, ainsi que les résultats concrets de leur application pour la connaissance et la conservation des œuvres bâties. Cette analyse critique permet de déterminer ce qui est à retenir de ces approches et ce qui est susceptible d'être complété, amélioré ou intégré pour une étude optimale de la stratification du bâti.

La deuxième partie est essentiellement consacrée à la production scientifique de notre travail, où on s'intéressera à la solution proposée dans le cadre de notre problématique. Cette partie est également organisée en deux chapitres. Dans le troisième chapitre, on aborde les différentes étapes de l'élaboration de notre méthode, les soubassements conceptuels, les procédures, le matériel et les données impliqués. Le quatrième chapitre est consacré à la mise en situation et l'expérimentation de la méthode proposée par une étude de cas. On introduit le cas d'étude sélectionné et une description détaillée du 'workflow' menée pour son étude stratigraphique. On discute ensuite, les conséquences de l'utilisation de l'approche proposée, et on établit un bilan des résultats obtenus.

Enfin, un chapitre conclusif est consacré à la synthèse générale de la recherche. Il récapitule l'ensemble du travail mené, met en évidence les principaux apports et les limites de la démarche proposée, et ouvre sur les perspectives ainsi que sur les pistes de développement futures de cette étude.

Le tableau synoptique suivant schématise la structure du document :

Tableau 1: structure de la thèse

<i>Parties</i>	<i>Chapitres</i>	<i>Sous-chapitres</i>
	Chapitre introductif	- Contexte scientifique - Problématique - Hypothèses - Enjeux et objectifs - Cas d'étude - Méthodologie - Structure de la thèse
Première partie <i>Approche thématique</i>	Chapitre premier	- L'acte de spolia : À l'origine de la stratification architecturale - La création des lacunes dans les œuvres du patrimoine bâti
	Deuxième chapitre	- La stratigraphie de déposition classique : une approche issue des sciences de la terre

		- La stratigraphie assistée numériquement
Deuxième partie <i>Cadre méthodologique et expérimental</i>	Troisième chapitre	- Impératifs, enjeux, et principes fondateurs d'une stratigraphie architecturale - Présentation de l'approche développée pour la stratigraphie architecturale
	Quatrième chapitre	- Introduction du cas d'étude - Application de la méthode proposée à l'étude stratigraphique de la Zaouïa Sidi Rached
	Chapitre conclusif	- Synthèse de la problématique - présentation sommaire de la recherche - Bilan des résultats - Limites - Perspectives de la recherche

I. Première partie : Approche thématique

Introduction de la partie I

« Dans les arts, et dans l'architecture en particulier, les définitions vagues ont causées bien des erreurs, ... » (Viollet-le-Duc 1854)

Cette observation met en lumière l'importance fondamentale de la détermination précise et explicite des différents concepts structurant la thématique abordée. Des définitions claires, univoques et partagées des soubassements conceptuels, des axiomes et des méthodes utilisées, ainsi que la détermination des limites du champ d'étude traité sont indispensables pour construire une réflexion rigoureuse, intelligible et scientifiquement valide.

Dans le cadre de cette thèse, la problématique abordée et les objectifs fixés font émerger un ensemble de notions centrales qu'il est impératif de clarifier. La présente section vise donc à expliciter le sens, la genèse et la portée de ces notions, en mettant un accent particulier sur les concepts de stratification et de méthodologies stratigraphiques. Nous retraçons ainsi leurs origines, leurs usages et leurs évolutions au fil du temps, afin de situer ces notions dans leur contexte historique, théorique et disciplinaire.

L'objectif principal est de poser la logique de la réflexion menée tout au long de cette thèse, de contextualiser le sujet au sein des débats scientifiques et pratiques en architecture, et de mettre en évidence l'intérêt et la pertinence de ces concepts pour l'étude du patrimoine bâti. Cette analyse permettra également de comprendre les dynamiques épistémologiques et cognitives qui ont façonné la perception et l'utilisation de ces notions, tant dans la sphère académique que parmi les praticiens et professionnels du patrimoine.

Chapitre premier : La stratification comme phénomène morphologique spatio-temporel

Introduction du chapitre.

La stratification constructive apparente à la surface du bâti historique, est l'incarnation physique de leur histoire diachronique et évolutive (HAOUACHA 2015). Ce phénomène omniprésent dans les œuvres du patrimoine bâti, se manifeste sous plusieurs formes et à différentes échelles : hétérogénéité des matériaux et des techniques de construction, diversité des langages stylistiques et ornementaux, ou coexistence et superposition d'éléments et d'espaces, tant à l'échelle architecturale qu'urbaine.

Cette configuration, à priori complexe et enchevêtrée, est le résultat d'un processus de transformation, intelligible à travers l'identification de la nature des rapports topologiques et chronologiques entre ses différents constituants. Longtemps considérée comme l'altération de l'état initial d'un bâtiment, la stratification est désormais perçue comme la « *biographie des bâtiments* »¹ retraçant leur morphogenèse et leurs parcours historiques.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'origine et à la logique sous-jacente à la stratification en architecture et dans le bâti historique plus particulièrement. On met en lumière sa genèse, sa perception et sa signification au sein de la communauté scientifique, ainsi que les valeurs véhiculées par sa prise en considération dans la conservation du patrimoine bâti. Pour ce faire, nous examinons les pratiques constructives à l'origine de cette configuration, en nous appuyant sur un ensemble d'exemples tirés de la littérature, issus de différentes civilisations et périodes phares de la zone circumméditerranéenne, dont l'influence sur l'histoire architecturale a contribué, directement ou indirectement, à façonner les modes de construction en Algérie.

1.1 L'acte de spolia : À l'origine de la stratification architecturale :

La pratique de la réutilisation et la transformation continue des vestiges des anciennes civilisations remonte à l'évolution de l'expression architecturale et artistique dès l'antiquité. En effet, qu'il s'agisse du réemploi des matériaux et du foncier, du pillage des œuvres monumentales ou encore de leur mobilisation comme vecteur d'expressions idéologiques et politiques, les artefacts les plus anciens transmis au fil de l'histoire étaient déjà intégrés dans un processus de réutilisation et de stratification. Cependant le regard porté sur ces biens stratifiés, ainsi que leurs significations n'ont cessé d'évoluer avec l'évolution même des notions de mémoire et d'histoire.

¹ Traduction de l'auteur d'après (Arslan 2021)

1.1.1 La réutilisation spontanée des œuvres du passé dans un continuel présent : de l'antiquité au haut moyen âge.

A l'aube des civilisations, les œuvres du passé étaient destinées au démantèlement, à la modification, et au réemploi conformément « à l'évolution des usages et des goûts, et susceptible d'entraîner... altérations et transformations »².

L'histoire de l'art situe la pratique de récupération des matériaux et des éléments architecturaux issus de bâtiments anciens, à l'antiquité tardive (ALI et Magdi 2016), comme en témoigne les textes législatifs notamment recueillis dans le code impérial de Théodose II (Alchermes 1994). Connue à l'époque sous le nom de *spolium*, terme dont le sens initial désignait les dépouilles et butins de guerre réemployés pour exprimer le pouvoir et la domination des empereurs (Kinney 2011), ce mot fit l'objet d'une réinterprétation à la Renaissance (Arslan 2021). Les néologismes *spolia*, *spoliata(e)* ou *spoliation* (Dumser 2018) en sont issus et renvoient désormais à la réutilisation et au réemploi de matériaux et d'éléments architecturaux prélevés sur des sites ou des artefacts préexistants pour la construction de nouveaux édifices (Lic 2013). Plusieurs recherches se sont consacrées à la question de '*spolia*' et de la fréquence de cette pratique dans les œuvres du bâti historique (« *Spolia Reincarnated* » 2018). En effet, diverses interprétations ont émergé de l'analyse minutieuse de cette forme de bâtir, ayant recouvert un nombre important de bâtiments imposants à caractère religieux, politique, ou publique.

L'instabilité militaire et économique dans l'empire romain, à partir du III^{ème} siècle, a fortement contribué au développement et à l'extension de l'utilisation de matériaux de récupération dans la construction. Cette pratique visait d'une part à pallier à l'incapacité et la difficulté de l'importation massive de matériaux nobles de régions lointaines comme il était de coutume chez les empereurs et les mécènes romains (Kinney 2001), et d'autre part à économiser et rationaliser les coûts d'édification et de production de matériaux de qualité supérieure.

Ainsi, l'évolution de l'intégration subtile et discrète des éléments constructifs recueillis, passait presque inaperçue à un œil amateur et peu observateur, si ce n'est à travers l'apport des écrits historiques, des récits locaux, de certaines inscriptions indiquant le contexte d'appartenance, ou à travers une utilisation dépareillée des pièces réutilisées (Dumser 2018). Dans ce contexte, la restauration du temple de Venus et de Rome édifié par Hadrien, et ravagé par un incendie durant le règne de Maxence, représente le cas d'une mise en œuvre totalement imperceptible des matériaux récupérés et harmonieusement réemployés pour la reconstruction de parties détruites

² F.Choay, cité par : (Tanguay 2013)

par le feu. Malgré l'intervention salvatrice de Maxence et sa consécration ultérieure en l'honneur de Constantin, le temple subsistait dans la mémoire collective comme œuvre de l'empereur Hadrien, grâce au témoignage apporté dans les illustrations et les récits du calendrier antique *Chronophage* 354 (Dumser 2018).

Inversement à ce premier constat, la diffusion de la pratique de réutilisation de l'ancien pour la reconstruction au IV^{ème} siècle, prenait des formes de plus en plus prononcées, et devenait visuellement assumée. Dans l'édification de l'arc de triomphe de Constantin à Rome —312 à 315 apr. J-C— la mise en œuvre incontestablement flagrante des statuette et des sculptures récupérées d'anciens monuments, retouchées, et employé dans la construction du nouvel artéfact (Figure 2) a longtemps fait débats auprès de la communauté scientifique et des spécialistes de l'architecture antique. Si l'hétérogénéité des éléments recueillis, ajoutée aux imperfections des sculptures contemporaines à l'époque de Constantin, a été considérée, en un premiers temps, comme l'incarnation d'un déclin technique, artistique et économique, des recherches plus approfondies mettent en évidence la connotation idéologique de cet acte. Elles soulignent l'importante charge symbolique du monument ainsi que le choix des sources de récupération des matériaux, destiné à inscrire Constantin dans la lignée d'empereurs phares de l'empire Romain.(Dumser 2018)

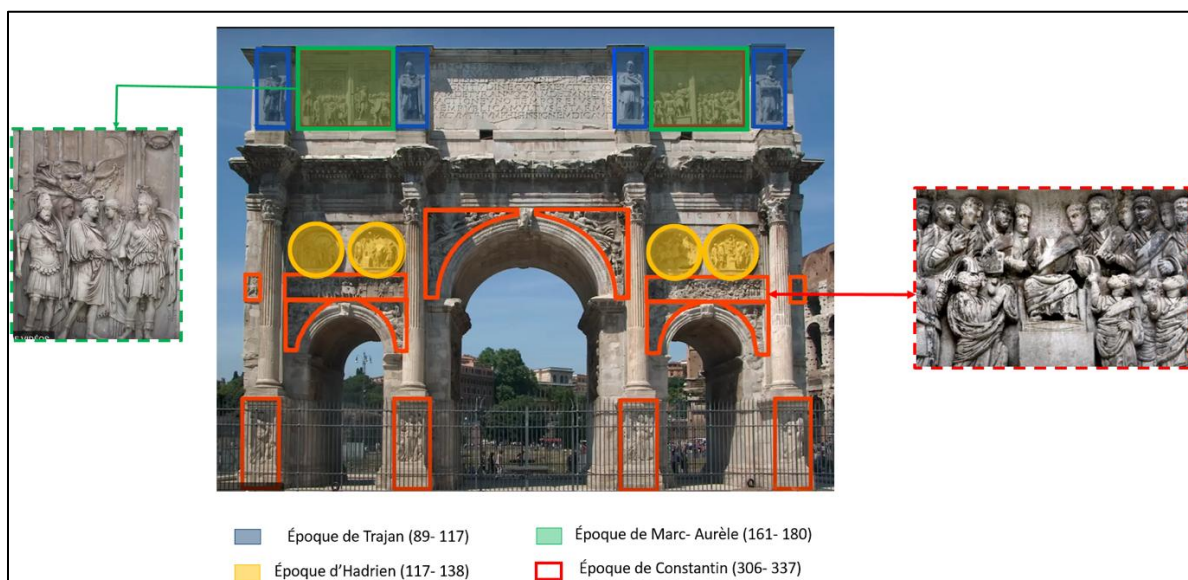


Figure 2: arc de triomphe de Constantin. A gauche : sculpture de l'arc d'Hadrien, à droite : sculpture réalisée pour l'arc de triomphe de Constantin.

Source : [Smarthistory – Arch of Constantine, Rome](#) retouchée par l'auteur

La réutilisation des matériaux et des éléments architecturaux s'est poursuivie au haut moyen Âge ; le bâti des anciens fut exploité en tant que source de matériaux de construction de bonne qualité et fut utilisé dans les soubassements pour les des nouvelles édifications ; ainsi « *les grands édifices de l'Antiquité sont transformés en carrière, ou bien récupérés et dénaturés* »(Choay 1996). Pour Dale Kinney, historienne de l'art spécialiste dans la Rome antique et médiévale, le réemploi des matériaux et des éléments architectoniques dans les cathédrales médiévales était une forme d'adhérence à l'autorité latine Romaine sur le monde occidentale. En effet, en plus du recours au Spolia matériel, les bâtisseurs des cathédrales du moyen âge faisaient, aussi, de la récupération idéale dans le langage constructif –notamment carolingien - et concevaient leurs œuvres en tant que « *citation littérale* » de la tradition architecturale classique romaine(Kinney 2001). L'exemple de la mosquée- cathédrale de Cordoue, permet d'illustrer les formes de récupération et re-contextualisation de l'existant pour la construction de nouveaux édifices (figure.3). En effet, cet antique temple romain dédié au culte de Janus, fut remplacé par la basilique wisigothe de saint-Vincent au VI^{ème} siècle, laquelle à son tour fut transformée en mosquée en 786 sous Abd-Errahmane Ier. Cette dernière a été construite en utilisant essentiellement les matériaux des deux anciens sanctuaires. La partie inférieure des éléments porteurs est entièrement constitué de colonnes préexistantes de marbre de divers types. Ces éléments porteurs, de forme complexe et distinctive, sont empreints de l'influence des anciens aqueducs Romains à étages, notamment celui de Los Milagros à Merida(Kinney 2001).

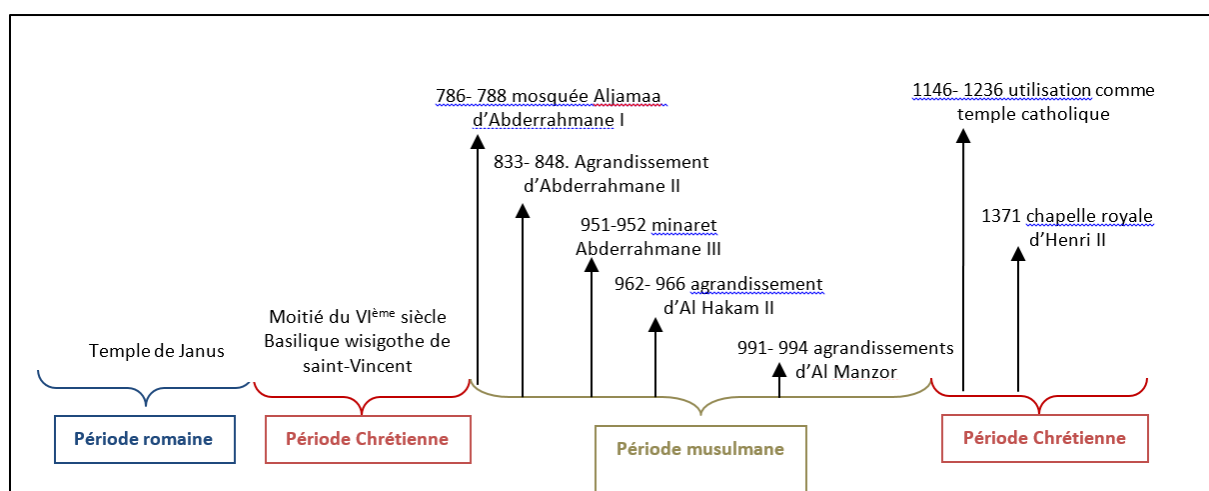


Figure 3: Histoire constructive de la mosquée de Cordoue de l'antiquité au XIV^{ème} siècle
Source : auteure

Parallèlement, en orient, avec l'expansion de l'empire islamique, le recours au Spolia était très répandue pour la reconstruction des villes dévastées par les conquêtes et les guerres successives. Dans la continuité de l'esprit de réemploi établi à l'ère de Constantin, l'hétérogénéité des éléments constructifs et décoratifs utilisés dans les nouveaux bâtiments est frappante, particulièrement dans l'art et l'architecture des omeyyades au proche orient. Dans les vestiges de la mosquée de Tibériade érigée sur l'emplacement d'un ancien temple Romain du II^{ème} siècle —identifié préalablement comme étant un marché couvert byzantin— on a relevé la réutilisation de pierres tombales en basalte appartenant à des sépultures juives de la période Romaine comme bases des piliers supportant la mosquée sur trois rangées (Cytryn 2009). Cette réaffectation de fonction témoigne d'un recyclage purement utilitaire et adaptatif des matériaux récupérés comme source de matière première rapidement accessible, transportable, et économique.

En plus de la récupération pragmatique des matériaux disponibles sur les sites et les bâtiments environnants, les pratiques d'importation des éléments architectoniques d'édifices célèbres de provinces lointaines, et de construction sur l'existant, étaient courantes en orient à l'époque islamique. Le transport de matériaux provenant de diverses régions du bassin méditerranéen comme la Cyrrestique ou Alexandrie (Lic 2013) a permis la construction d'œuvres phares de l'architecture islamique, comme la mosquée de Damas ou la reconstruction de Jérusalem. Cet investissement humain et matériel pour la réutilisation d'éléments préislamiques est justifié par des raisons principalement idéologiques et symboliques. Pour B. St Laurent le recours au Spolia à Jérusalem à l'ère des Omeyyades et particulièrement durant le règne de Mu'awiya était évocateur de tolérance et de respect du nouveau régime politico-religieux vis-à-vis aux précédents. Cette pratique faisait de la Jérusalem musulmane l'emblème de l'équivalence entre musulmans, juifs et chrétiens, visant par le langage architectural l'exhibition délibérée et consciente d'une communauté « *multiculturelle et multi-religieuse* »³. Ainsi, on peut voir sur la façade extérieure de la porte de la miséricorde la coexistence de piliers et de chapiteaux corinthiens datant de la période byzantine avec les plaques de décoration omeyyades surmontant la structure. Dans la cité intramuros, le dôme du rocher —ainsi que le dôme de la chaîne— témoignent de l'intégration des traditions constructives passées, à travers, d'une part la symbolique de l'édifice inspiré de la forme des églises chrétiennes octogonales, et d'autre part, l'importante diversité des matériaux de récupération in-situ, explicitement exposés. On note particulièrement les colonnes de différents types de marbres, ornées d'une diversité

³ Traduction de l'auteur d'après (Laurent 2022)

remarquable de chapiteaux, dont les tailles et les hauteurs disproportionnées indiquent leur destination originelle, à d'autres bâtiments. Ajoutée à cela, la riche décoration polychrome dites d'influence sabéenne —le palais des rois de Sabaa— et la réutilisation de plaques de marbres extraites d'anciennes églises pour le revêtement de façades extérieures, accentuent le caractère idéologique de l'expression de l'ouverture de la nouvelle autorité sur les cultes et les cultures passées, et l'intégration de ceux-ci dans l'empire nouvellement installé (Laurent 2022).

En plus des motivations techniques, économiques et symboliques, une autre lecture est proposée par les chercheurs s'intéressant à la fin de l'Antiquité. Elle concerne le recours au réemploi du bâti préexistant dans la construction des œuvres contemporaines durant la domination musulmane. Cette nouvelle théorie qui est à l'origine du concept de « *Varietas* » (Niewöhner 2019) stipule que la forte hétérogénéité des éléments constructifs et décoratifs apparents dans les œuvres de l'architecture islamique, n'est qu'expression d'un nouveau langage esthétique basé sur « *un conglomérat de styles, de formes, de matériaux* »⁴ au service de la production architecturale et urbaine.

Au-delà de la diversité des intentions ayant conduit à la réutilisation et la transformation de l'existant pour bâtir, le spolia incarne la forme naissante de la stratification architecturale. Cette pratique a ouvert la voie à l'émergence de nouvelles formes et modes de construction, qui se sont succédé au fil de l'histoire, mettant en scène l'évolution diachronique des lieux et des paysages.

1.1.2. Les matériaux hors contextes bâti et historique : le moyen âge

L'évolution du style gothique en occident, à partir du XII^{ème} siècle, semblait mettre un frein à la pratique de spoliation matérielle dans les nouveaux édifices. En effet, l'uniformité du nouveau langage stylistique, ses caractéristiques formelles, structurelles et spatiales intrinsèques, ainsi que la sémantique (Frankl 2000) rattachée, laissent peu de place à la possibilité d'intégration d'éléments involontairement conçu —sur-mesure— pour les bâtiments de ce style. Néanmoins, certains chercheurs qui se sont attelés sur le sort des œuvres de l'antiquité au moyen âge central, ont permis de mettre en lumière la constance de cette pratique et les modalités de sa mise en œuvre. Une étude de D. Kinney consacrée au *Spolia* à travers un examen minutieux des sculptures et statues de récupération païennes dans les églises médiévales du XII^{ème} au XIV^{ème} siècles⁵ à Rome, met en évidence une réappropriation et une

⁴ Traduction de l'auteur d'après (Lic 2013).

⁵ Traduction de l'auteur d'après (Kinney 2018)

re-sémantisation des éléments de spolia par remodelage et modification de l'apparence originelle. Cet acte défini par Panofsky comme « *principe de disjonction* »⁶ permettait de « *neutraliser le pouvoir des images antiques à travers deux stratégies : la reclassification allégorique et l'appropriation esthétique* »(Kinney 2018). La réutilisation ostensible et explicite des spoliations, est peu commune, voire exceptionnelle dans le bâti gothique, ce qui se traduit par la recherche d'une esthétique nouvelle en rapport à la spiritualité chrétienne d'une part, et le recours, purement utilitaire, aux éléments architectoniques préexistants d'autre part. Pour A. Cutler, cette pratique détermine un usage continu de matériaux anciens qui justifié par le besoin, plutôt qu'une « *réutilisation ou spoliation* » qui désigne à contrario un historicisme délibéré(Kinney 2011).

Parallèlement, l'essor économique des républiques maritimes italiennes –Pise, Gênes et Venise– au moyen âge central, a mis en évidence de nouveaux rapports entre architecture médiévale et spoliation ornementale et structurelle. Les échanges commerciaux autour de la méditerranée, ont ouvert la voie à l'importation extensive de matériaux et d'artéfacts utilisés principalement dans la construction des bâtiments civiques et religieux du nouvel empire commercial, engendrant de nouveaux usages et de nouvelles significations. L'utilisation des céramiques de l'artisanat des régions islamiques dans la décoration des façades de la basilique Saint-Pierre l'apôtre à Pise, reste l'un des exemples les plus marquants de cette pratique. En effet, cette mutabilité des objets domestiques hors leur contexte d'origine, en éléments d'art et d'architecture « *en a fait l'instrument par excellence pour forger des relations temporelles et spatiales avec les personnes et les objets* »⁷. A Venise, le caractère éclectique de la basilique de Saint-Marc intégrant les statues en Bronze rapportées de l'Hippodrome de Constantinople —celles-ci même transportés préalablement de la Grèce antique, puis de Rome vers Byzance— permettaient d'inscrire divers chapitres de l'histoire sur la surface du bâtiment, invoquant simultanément différentes significations et symboliques (figure.4). Il est de même pour l'utilisation des Piliers de Saint-Jean d'Acre devant l'entrée Sud de la basilique, dont la transformation de fonction des éléments qui étaient, à la base, porteurs, vers des éléments purement décoratifs et triomphaux. Ce qui a engendré de nouvelles interprétations, exprimant des idées et des émotions à la fois singulières et polysémiques(Mathews 2015) (figure.5).

⁶ Idem

⁷ Traduction de l'auteur d'après (Mathews 2015)



Figure 4 : la façade principale de la basilique Saint-Marc surmontée des statues de chevaux en bronze envoyé de Constantinople par le Doge Enrico Dandolo.

Source https://www.e-venise.com/eglises-venise/chevaux_basilique_saint_marc_venise.htm



Figure 5 : les “Pilastrici acritani” à la place Saint-Marc de Venise.

Source : <https://www.bisanzioit.blogspot.com/2011/11/i-pilastrici-acritani-venezia.html>

Par ailleurs, la présence de l'acte de spoliation, dans sa forme la plus extrême au moyen âge, est observée en Anatolie, notamment, lors du règne des dynasties seldjoukides. En effet, l'instabilité politique et la succession de conquêtes religieuses dans la région, a conduit à un

dynamisme permanent et à une reconfiguration successive de l'espace bâti, dictés par un besoin urgent de reconstruction des bâtiments et des cités ravagés par les guerres. Le cas des vestiges du caravansérail de Obruk Han près de la cité de Konya, considéré comme étant un « *musée d'éléments spoliés* »⁸, permet de mettre en évidence une riche collection de pièces et de matériaux récupérés des anciennes bâtisses ; dont la mise en œuvre, le positionnement et l'agencement attestent à la fois d'un réemploi utilitaire, et d'un choix pleinement réfléchi et conscient. En effet, l'utilisation fragmentaire d'éléments architecturaux dépourvus de leurs fonctions et significations primaires —constructives soient-elles ou décoratives— met en exergue le caractère pragmatique de la spoliation comme choix économique en termes de délais, de foncier, et de coût. Tel est le cas des colonnes disproportionnées du caravansérail susmentionné, soulevées par des bases de piliers en pierre afin d'atteindre la hauteur sous plafond des parties couvertes de la bâtisse (figure .6). Il en va de même pour le réemploi de fragments d'architraves en fondations, et de stèles funéraires et bouts d'inscriptions comme briques de construction pour les différents murs intérieurs et extérieurs. En concomitance, l'utilisation d'objets liturgiques byzantins dans ces bâtiments publics, mettait en avant l'hospitalité des lieux, et leur connotation cosmopolite et transculturelle. On observe aussi, cela, dans la réutilisation des pièces de décoration figuratives zoomorphiques et anthropomorphiques dans les édifices religieux islamiques, tel que les medersas et les mosquées, comme signe d'ouverture et de maintien des valeurs à travers les changements politico-religieux (Mcclary 2015).



Figure 6 : spolia dans les vestiges du caravansérail Obruk Han avant sa rénovation. Sources : Eravşar, O. 2016

⁸ Traduction de l'auteur d'après (Eravşar 2017)

Le recours au spolia dans les républiques maritimes italiennes et l'autorité Seldjoukide, malgré leur prospérité économique, notamment dans les bâtiments publics de grandes importance, démontre que le réemploi des vestiges des anciens pour la construction, était un choix conscient et délibérément établi par les bâtisseurs et les décideurs. Nonobstant leurs diverses motivations, visant principalement à construire un présent emblématique représentant les nouveaux empires installés et leurs réalisations politiques, la pratique de spoliation a joué un rôle non négligeable dans la préservation et la transmission matérielle des œuvres et des savoir-faire séculaires.

1.1.3- La Renaissance et la prise de recul envers un passé historique achevé et emblématique :

La séparation sémantique avec le passé et son abstraction comme unité historique détachée de l'instant présent, ainsi que les nouvelles propensions artistiques et intellectuelles de la renaissance, ont mené à la redécouverte des vestiges des civilisations gréco-romaine comme emblème d'art et de gloire. En effet, pour les artistes, architectes et urbanistes de la renaissance, les œuvres de l'antiquité sont source de savoir et savoir-faire des anciens, foyer d'inspirations et de créativité pour une génération en quête d'identité et d'esthétique nouvelle. Avec l'épanouissement du Quattrocento, on commença à s'intéresser aux artefacts de l'antiquité : on développa, alors, l'étude des proportions, des sculptures et des éléments architectoniques, et on établit des relevés des anciens bâtiments afin d'analyser la logique stylistique et compositionnelle des œuvres, telle que le fameux relevé de Pirro Ligorio (1513- 1583) de la 'villa Adriana'. Les legs antiques se virent, alors, attribuer un nouveau statut d'œuvre d'art et d'histoire et furent considérées comme modèles pour la production et la conception architecturale.

Avec cette nouvelle conscience historique, apparaissaient les pratiques de fouilles et de recueil de pièces antiques, non plus comme matériaux de récupération pour la construction mais comme objets d'art et d'ornementation(Christian 2010). Les familles aristocratiques et les hommes de religion s'accaparaient des vestiges de l'antiquité pour enrichir leurs prestigieuses collections et décorer leurs nouveaux édifices(Stenhouse 2017). Ainsi « *l'architecture n'exprime pas (plus) que son temps, mais s'inscrit toujours dans un monde vécu [...] comme remémoration d'un passé mais comme actualité* »(Tanguay 2013). Dans ses travaux sur le phénomène du Spolia(Koortbojian 2011), M. Koortbojian présente des cas d'étude phares de l'architecture de Rome du XV^e et XVI^e siècles, analysant scrupuleusement l'acte de réutilisation des antiquités dans l'édification contemporaine italienne à la renaissance. Dans le Palais *Mattei di Giove*, l'expression du classicisme est apparente dans le dualisme entre l'austérité des façades extérieures et l'exubérance de l'ornementation des cours et des loggias

intérieures. On peut également le voir dans le traitement des façades introverties des deux patios, composés principalement de spolia comportant des fragments de sculptures antiques, des statues, des bas-reliefs et des éléments architectoniques provenant de la collection privée du riche mécène, et utilisés comme pièces maîtresses pour la décoration des lieux. Ce qui est particulièrement frappant dans cet édifice, est l'acte de spoliation en lui-même, regroupant à la fois pièces inachevées ou restaurées, et reproductions mimétiques contemporaines des éléments spoliés dans une organisation rythmée et harmonieuse, soulignant ainsi la symbiose entre passé et présent, et matérialisée par l'interaction entre spolia authentiques et réincarnations modernes (figure.7). Cette mise en œuvre intentionnelle et réfléchie, est l'expression de l'inscription de l'Italie contemporaine dans un présent florissant riche d'un passé glorieux, et désireux de renouer avec ses origines.

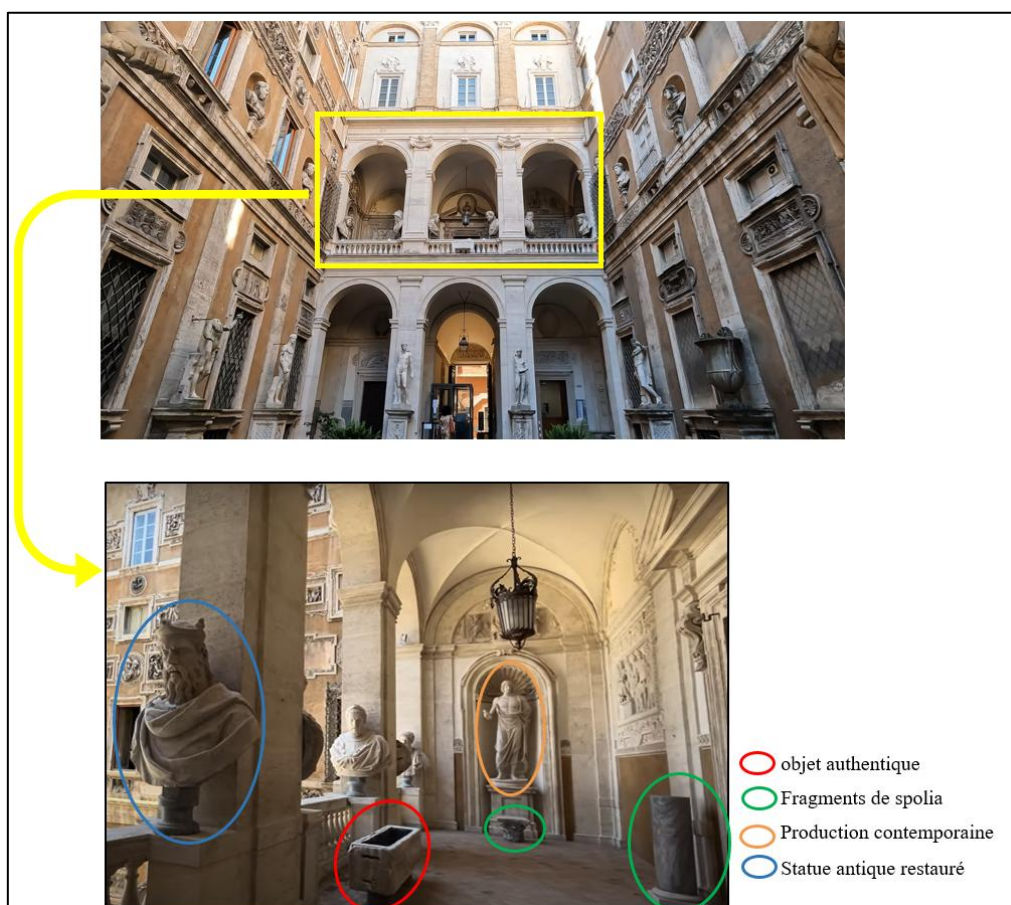


Figure 7: Palais Mattei Di Giove. En haut : façades introverties du premier patio. En bas: loggia au première étage donnant sur le patio.

Source : <https://www.youtube.com/watch?v=PvqQSSjmuNg> traitement : auteur/ Alan Gilbert dans <https://www.youtube.com/watch?v=qHrI22BijWA&t=198s>

La pratique d'exhibition des pièces de collections dans l'espace bâti était très fréquente en Italie en cette période. La *casa di Lorenzo Manlio* a marqué le paysage urbain Romain à partir du XV^e siècle avec son cachet à la fois intrigant et expressif. Si, dans l'exemple du palais Mattei, les éléments spoliés étaient soigneusement arrangés — créant un équilibre fondé sur la symétrie, la proportionnalité et l'agrégation de statues homogènes — l'œuvre de Manlio, en revanche, apparaissait comme un patchwork issu d'une modeste collection. Elle mêlait des éléments antiques distincts, hétéroclites et disposés de manière aléatoire sur la façade, auxquels s'ajoutait une inscription contemporaine dont la démesure accentuait la sobriété de l'immeuble et l'effacement des antiquités réemployées. Cette première impression est cependant démystifiée par l'énoncé de l'inscription (Koortbojian 2011) stipulant les liens de sa famille et de sa ville à la Rome impériale, proclamant sa contribution en tant que citoyen, dans la préservation des idéaux antiques d'une part, et dans la reviviscence de la cité dans toute sa splendeur d'autre part (figure.8).



Figure 8: Casa di Lorenzo Manlio . En haut : Façades de la maison. En Bas : détail des bas-reliefs et de l'inscription contemporaine.

Source : <https://www.roma.com/lo-strano-caso-di-un-palazzo-romano-datato-nel-futuro/> et : <https://romedailyphoto.wordpress.com/tag/lorenzo-manlio/>

Le recours au spolia et à l'utilisation de l'ancien bâti, à durant la renaissance, était un acte intentionnel à des fins exclusivement artistiques et expressionnistes, plutôt que le résultat d'un besoin économique, et d'une quête de facilité et rapidité d'exécution. Cette thèse est d'autant plus affirmée par le fait de l'éclosion, même, de la Renaissance à Florence —dont l'héritage matériel antique est modeste— au lieu de Rome foyer de la gloire et de la virtuosité de l'empire impérial(Ar 2015). En effet, la prospérité du paysage urbain Florentin à partir du XIV^e siècle s'est esquissée, principalement, à travers le transfert d'œuvres en provenance de Rome riche en antiquités et en legs historiques. Il en est de même pour Venise, emblème de l'essor culturel et artistique de l'époque, dont l'approvisionnement coûteux et fastidieux en matière première et en éléments constructifs, émanait principalement de Constantinople.

Face à l'essor et la diffusion de la renaissance en occident, l'expansion de l'empire ottoman au proche orient, a également, été marquée par l'émergence d'un style architectural imprégné d'art et d'architecture historiques. Le style ottoman fortement influencé par les productions byzantines, islamiques et perses, s'est caractérisé par une réutilisation importante des œuvres des temps et cultures antérieurs pour la composition d'un nouveau langage architectural. En effet, en plus du spolia matériel consistant en un réemploi des matériaux de construction, et d'éléments architectoniques issus des bâtiments préexistants, cette réutilisation s'est manifestée sous plusieurs formes. Parmi celles-ci 1) la '*spoliation conceptuelle*' (Neumeier et Jevtić 2019) via '*la réincarnation*' (Neumeier et Jevtić 2019) des idées des anciens bâtisseurs pour l'aménagement et l'expression ; 2) la '*spolia technique*'(Ar 2015) par la reprise des systèmes constructifs et structurels des prédécesseurs ; 3) ou encore la spoliation de bâtiments à travers la réaffectation d'édifices dans leur intégralité au service de nouvelles orientations politico-religieuses et sociales(Ar 2015). Cette dernière pratique est considérée selon par les chercheurs parmi lesquels figurent T. Tanyeri-Erdemir et M. Fabricius Hansen, comme « *cas extrême [...] et forme radicale de spoliation* »⁹. Dans ce contexte, la mosquée *Hagia Sophia*, œuvre emblématique et historique des ottomans et de leurs prédécesseurs, illustre parfaitement les différentes récupérations pour la construction du le bâtiment, ainsi que les diverses significations sous-jacentes tout au long de son existence. L'édifice a fait office de constructions multicouches et d'entassement du bâti résultant de l'appropriation et des travaux successifs de réparation, d'appropriation et de modification qu'ont connu les lieux, dus principalement à la forte prédisposition sismique de la zone en question, et de l'instabilité politico-religieuse. En effet, les parties les plus anciennes de l'actuelle mosquée, remontent à l'époque de Justinien I^{er}

⁹ Traduction de l'auteure d'après (Arslan 2021)

au VI^e siècle, dont l'église, elle-même, était une reconstruction de la précédente Hagia Sophia de l'ère de Théodose II anéanti par les flammes. Après plusieurs opérations de réfection et de consolidation au cours des siècles suivants, Hagia Sophia a été reconvertie en mosquée en 1453, sous le règne du sultan Mahmet II. Elle gardera sa fonction qui perdurera jusqu'au XX^e siècle, puis elle servira de musée avant de reprendre à nouveau sa fonction de mosquée en 2020 (figure.9). Son histoire diachronique est inscrite dans sa masse bâtie à travers la superposition aussi bien matérielle, que technique et stylistique de ces volumes et de ses espaces. Son dôme qui fait sa notoriété à l'échelle mondiale, est une spolia conceptuelle du dôme du panthéon en tant que source d'inspiration et d'émulation technique et politique (Kissous 2020). Pareillement pour l'intégration d'un minaret pour l'indication de la domination islamique et de la nouvelle vocation de l'édifice —suivi du rajout de trois autres minarets pour des raisons purement esthétique. Le recours aux contreforts et aux arc-boutons comme moyen de stabilisation et de renforcement de la structure durant la domination Latine (1204- 1261) (Kissous 2020) indique un Spolia technique de l'architecture médiévale occidentale (figure.10). Enfin l'étude des surfaces intérieures et extérieures du bâtiment, permet de relever un important recours aux matériaux de récupération, constructifs soient-ils ou décoratifs. Ceci est perceptible à travers la disposition disproportionnée des fragments, telle la réutilisation des corniches byzantines en marbre dans les imposants contreforts de la façade principale. De plus, l'acte de spolia est marqué par une décontextualisation des éléments architectoniques comme le réemploi des colonnes à chapiteaux-impostes issus des citernes souterraines du VI^e siècle dans le *protiro* sud-ouest de la mosquée (Guiglia et Barsanti 2019), ou encore par le remodelage des œuvres ornementales et iconographiques comme la couverture des mosaïques chrétiennes de revêtement monochrome.

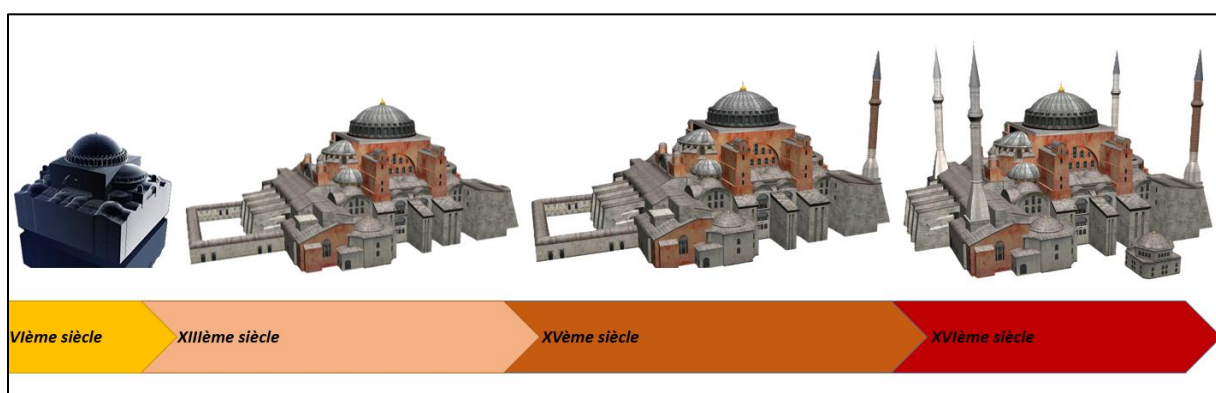


Figure 9: Hagia sophia comme bâtiment spolié (basé sur des reconstitutions).

Sources : <https://www.youtube.com/watch?v=qM6hWEZbeu8&t=1786s> traitement : auteure.
<https://www.youtube.com/watch?v=rFOlOZzO3jY> , Traitement : auteure

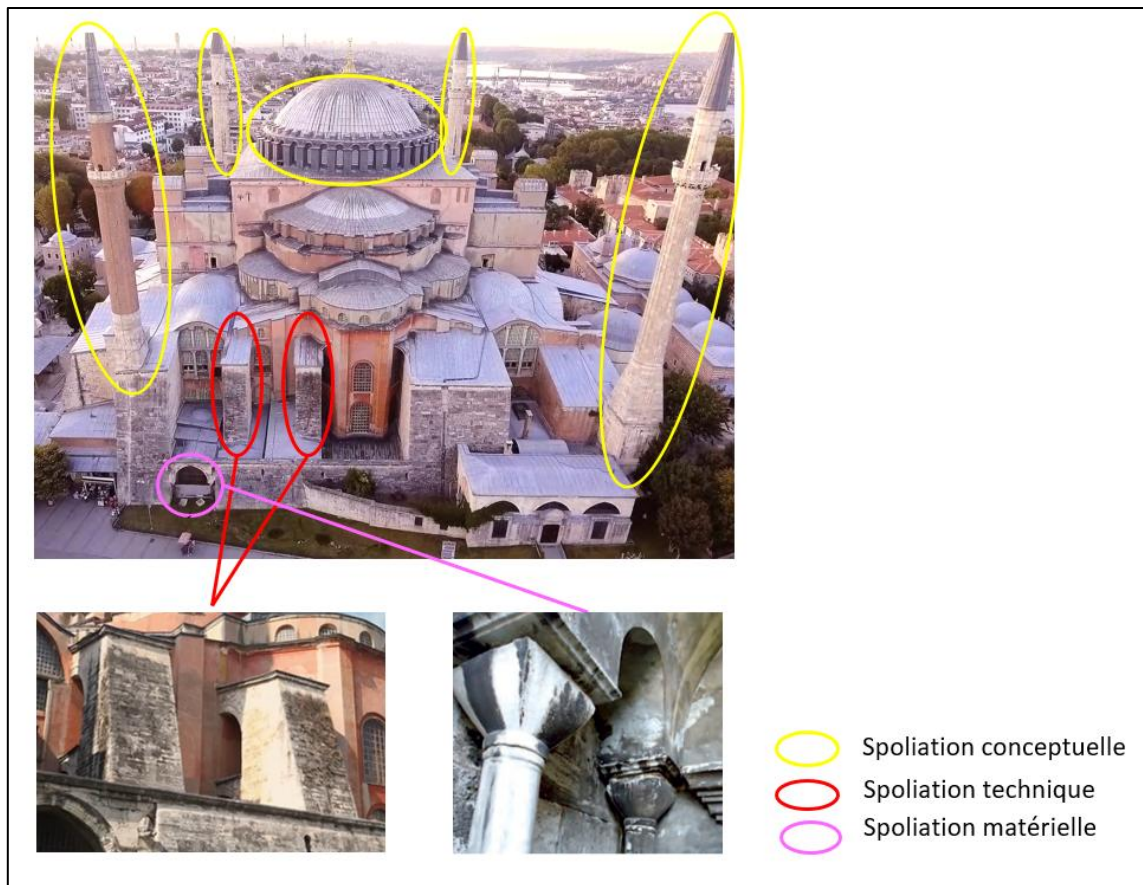


Figure 10: les différents types de réutilisation des œuvres du passé jusqu'à l'époque ottomane à Hagia Sophia

Sources : [documentaire : "ancient superstructures: Istanbul's Hagia Sophia"](#) . Traitement : l'auteure

Ainsi, la stratification comme résultat logique du spolia, était un phénomène omniprésent dans les œuvres bâties des ottomans que ce soit en tant que récupération factuelle ou mimétique. Une telle tendance est interprétée par les chercheurs comme une riposte au mouvement de l'Europe de l'Est, qui s'était pleinement attribué la possession du patrimoine de l'Antiquité à travers les productions artistiques de la Renaissance. Elle mettait en lumière l'ascendance troyenne des Ottomans et leurs liens historiques avec l'Empire romain dissous, notamment par la réappropriation des productions artistiques et architecturales byzantines(Ar 2015).

L'acte de construire sur les ruines, avec les ruines, et conformément aux ruines caractérisant les œuvres de l'architecture produite autours du bassin méditerranéen à partir du XIV^{ème} siècle, représente un renouement avec l'histoire et les origines des peuples, des terres et des styles,

dans une démarche de création et de composition identitaires, culturelles et artistiques inhérentes.

1.2. Artéfacts historiques et chronologie : prise de conscience envers la fréquence de la stratification dans le bâti historique.

À la fin de la Renaissance, de nouvelles perceptions des œuvres historiques émergent, accompagnées de pratiques inédites mettant en scène « *un présent durable, riche du passé et ouvert sur l'avenir* » (Tanguay 2012). C'est dans ce contexte, que se développent la philologie, l'histoire de l'art, l'archéologie et la conservation du patrimoine culturel. Ces disciplines jouent un rôle déterminant dans la mise en évidence, l'analyse et la durabilité des formes de stratification dans les monuments historiques.

1.2.1. La création des lacunes dans les œuvres du patrimoine bâti :

Les instabilités politico-religieuses et les mutations sociales et intellectuelles qui ont marqué les pays Européens au XVII^e et XVIII^e siècles, ont engendré la naissance de nouveaux concepts, tels que biens nationaux, monuments historiques, ou patrimoine bâti, ouvrant la voie à des pratiques de réutilisation du bâti historique à travers des actes de diverses natures et de différentes étendues. À l'époque, les artéfacts du passé considérées comme emblème d'art, de savoir et de suprématie des peuples, étaient associées aux plus hautes autorités des pays. Ainsi, hommes de religion, familles royales, noblesse et forces militaires s'accaparaient des œuvres d'art et d'histoire, lors de la construction de leurs propriétés privées, ce qui mettaient ces œuvres d'avantage en danger, considérées comme cibles principales lors des guerres et des conflits civils et politico-religieux.

Lors de la guerre de Morée en 1687 en Grèce, qui opposait l'empire Ottoman aux vénitiens, l'attaque de l'acropole, qui était le principal bastion d'Athènes, a eu pour conséquences la destruction irréversible du Parthénon. Ce monument considéré comme l'une des œuvres les plus emblématiques de l'antiquité Grecque, occupait à l'époque la fonction de mosquée du régime en place, et il a été transformé en temps de guerre en dépôt de munition d'armes, et refuge pour femmes et enfants (Jokilehto 1999) (figure.11) et (figure.12). Après la guerre, les ruines subsistantes dans la cité historique, ont été démantelées et utilisées pour la fortification de l'acropole à des fins purement militaires et stratégiques, ce qui a contribué à une perte totale imparable de cet ultime enseignement de l'art, de la culture, et du savoir-faire antique.



Figure 11: Le Parthénon lors de la guerre de Morée 1687.
Source : J.J Jokilehto

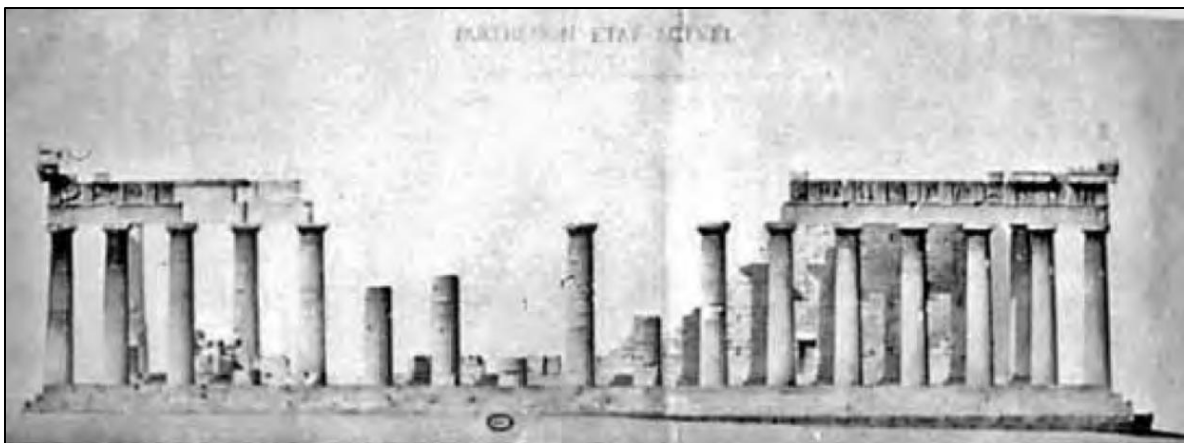


Figure 12: relevé de l'élévation nord du Parthénon effectué par Alexis Paccard en 1845.
Source : J.J Jokilehto

Au siècle suivant, la révolution Française fut marquée par une destruction massive des bâtiments historiques et des monuments. En effet l'assemblée nationale avait stipulé en 1792 que « *toutes inscriptions, signes, monuments ou symboles rappelant le roi ou la féodalité devaient être détruits dans l'immédiat* »¹⁰. Ceci a enclenché un long processus de dégradation, causant une perte irrévocable d'une bonne partie de l'histoire artistique et culturelle du pays. Face à ce « *vandalisme révolutionnaire* » (Grégoire 1794), de nouveaux mouvements intellectuels et écoles de pensées ont vu le jour, notamment les courants du nationalisme et du romantisme. Les principaux pionniers de ses mouvements, parmi lesquels l'abbé Grégoire, ont

¹⁰ Traduction de l'auteure d'après (Jokilehto 1999)

mis l'accent sur l'importance des bâtiments anciens comme témoins et chapitres historiques d'une part, mais aussi comme repères identitaires et nationaux d'autre part. Ainsi, à partir de la fin du siècle, des mesures furent prises pour la promulgation de textes législatifs pour la protection, des œuvres architecturales et artistiques. Des commissions chargées du suivi des travaux de conservation ont été mises en place. Des inventaires des biens nationaux ont été réalisés, accompagnés de bilans détaillant leur état de conservation. Parallèlement, des collections d'œuvres d'art ont été constituées avec soin et déposées dans des musées.

Avec cette nationalisation des biens historiques, des musées nationaux ont été créés comme foyers pour la préservation, le dépôt, et la diffusion des œuvres d'arts et d'histoire des peuples. Cette pratique s'est manifestée par un détachement et une délocalisation de fragments et de pièces entières de leurs sites de provenance, afin de les étudier, les réparer, et les exposer dans des conditions favorables à leur longévité.

En Italie, tel fut le cas des deux sites antiques d'Herculanum et de Stabies, dont l'exploration au XVIII^{ème} siècle reposait principalement sur la dislocation des objets, et la lecture isolée et fragmentaire des pièces recueillis. En effet, en 1716, Herculanum constituait la principale source d'antiquités de la collection privée de Charles III, duc d'Elbeuf, qui avait acquis le terrain d'emplacement du site, et y avait mené des fouilles en profondeur(Petrillo 2019).

Cette attitude matérialisée par la création de lacunes —désignées ultérieurement comme unités stratigraphiques négatives— dans la matérialité des œuvres fut fortement dénoncée par les adeptes du mouvement romantique. Quatremère-De-Quincy affirmait que « *les musées étaient la fin de l'art [...] les fragments de l'histoire devenaient alors des artefacts morts* »¹¹. Les monuments ne pouvaient être cernés en dehors de leur contexte et leur intégralité, les dépouillant ainsi de leurs valeurs intrinsèques cognitives et artistiques, et portant atteinte aux populations en mutilant leurs principales sources de connaissances. Sa position a été soutenue par l'abbé Grégoire, qui considérait l'objet historique comme un document à part entière, intelligible uniquement dans son intégralité, en tant qu'élément indissociable d'un environnement immédiat plus vaste(Jokilehto 1999).

Ce constat a fait écho auprès des archéologues, des historiens de l'art et des architectes conservateurs. On vit alors au XIX^e siècle la naissance de l'archéologie du terrain par opposition à l'archéologie de l'objet, et la pratique de conservation du bâti historique in-situ.

¹¹ Traduction de l'auteure d'après (Jokilehto 1999)

1.2.2. Les œuvres du patrimoine bâti dans leurs contextes physique et historique. :

Après la découverte d'Herculanum et les travaux entrepris sur son site à partir de 1738, puis sur celui de Pompéi en 1748, une nouvelle pratique en rapport aux œuvres historiques, a vu le jour avec l'arrivée de l'ingénieur Karl Weber en 1750 sur les sites Vésuviens (Petrillo 2019). En effet, le dégagement et l'exploration des sites en aires ouvertes, a mis en évidence l'importance de la lecture des vestiges dans leur emplacement originel, et la probable perte d'information causée par le déplacement de ceux-ci. Vouée à l'oubli pendant plus de quinze siècles, l'emplacement des cités antiques libérées d'une épaisse gangue couche de cendre volcanique, a permis d'appréhender et de dater la disparition de celles-ci. En outre, les études topologiques, morphologiques, et iconographiques des structures construites et des restes anthropiques, ont permis de reconstituer l'organisation de l'espace, ainsi que les dynamiques sociales et culturelles, offrant une compréhension impossible en dehors du contexte physique et contextuel.

Face à l'importance des découvertes historiques et cognitives engendrées par la lecture de ces cités antiques in-situ, la pratique se repend en Europe. La volonté des pays à prouver l'ancienneté et la suprématie de leurs origines, a généré le lancement de plusieurs travaux de fouilles et d'analyse des vestiges historiques dans leurs contextes bâtis et environnementaux. Désormais le détachement des artefacts de leurs terrains d'implantation, est perçu comme une dilapidation et une destruction de documents et de preuves historiques et scientifiques.

J.J. Winckelmann, historien de l'art et archéologue du XVIII^e siècle, reconnu comme le père de l'histoire de l'art, a introduit la notion de « *développement stylistique* » (Jokilehto 1999), mettant en évidence l'évolution progressive des styles artistiques à travers le temps. Dans son ouvrage *Histoire de l'art chez les Anciens* (Winckelmann 1802), Winckelmann met en évidence le lien étroit entre les productions artistiques, et leurs contextes physique et historique. Il retrace la genèse de l'art à travers les différentes civilisations antiques et explique la diversité des expressions artistiques par l'influence de l'environnement géographique, de l'époque de création et des conditions socio-politiques. Selon lui, l'art est le fruit de multiples facteurs, notamment le climat, l'organisation des gouvernements, le niveau intellectuel et éducatif des sociétés, ainsi que leurs traditions et croyances religieuses. Il soutient la thèse de la nécessité de la lecture des artefacts in situ, posant ainsi les fondements de l'archéologie de terrain.

Cette approche du traitement et de la manipulation des vestiges in situ, perdurera jusqu'au XX^e siècle dans la pratique patrimoniale, s'imposant comme un principe fondamental et largement

consensuel de la conservation du bâti historique. Lors de la rencontre internationale autour des monuments historiques qui s'est déroulée à Venise en 1964, la question de l'importance du cadre bâti et environnemental et de la nécessité du maintien des monuments dans leurs sites originaux, fut abordée. En effet on peut lire dans les recommandations des actes délivrés suite au congrès, la préconisation de l'indissociabilité du monument de son site d'érection, et de son histoire est soulignée (ICOMOS 1964).

Pareillement, dans la charte de Burra établie en Australie en 1979, puis modifiée en 1999, on met l'accent sur l'importance du cadre physique et environnemental dans lequel a été érigé l'œuvre historique comme car faisant partie de son système de valeur (Australia ICOMOS 1979).

Désormais, les différentes strates constructives d'un bâtiment historique sont perçues comme des parties intégrantes d'un ensemble bâti diachronique, reflétant les transformations successives de l'édifice. Chacune de ces couches, inscrite dans une continuité temporelle, témoigne d'un moment précis et emblématique de l'histoire des villes et des civilisations.

Ainsi, l'exploitation des artefacts historiques in situ, a ouvert de nouvelles perspectives sur l'étude du patrimoine bâti, en révélant des données essentielles sur les ressources matérielles employées, l'interaction avec l'environnement, les agents de dégradation, ainsi que sur les motivations ayant orienté l'implantation des constructions. L'étude des artefacts dans leur contexte physique a également permis d'interpréter les usages sociaux, à l'origine de la stratification, inscrits dans l'organisation spatiale, et de mettre en lumière la diversité des langages stylistiques et des techniques constructives au sein d'un même espace. Cette approche marque les prémices de la reconnaissance de la stratification comme caractéristique prépondérante des biens du patrimoine bâti.

1.2.3. La conservation architecturale : de la stratification spontanée à la stratification planifiée

La nouvelle perception des monuments historiques a ouvert le débat dès la fin du XVIII^e siècle sur la nature d'intervention, et sur le degré thérapeutique et/ou invasif des opérations de conservation et de restauration apportées. Celles-ci se traduisaient concrètement, par une réutilisation et une réappropriation des œuvres du passé, soit par adjonction, par retrait, ou par modification partielle ou totale, créant ainsi des transformations morphologiques et un empilement de pans constructifs dans la masse du bâti.

La pratique de conservation des œuvres bâties in situ, a mis en lumière l'omniprésence du phénomène de stratification sur les surfaces des monuments, par la mise en évidence des traces

d'un passé diachronique, portées par les œuvres d'une part, et l'amorce de futures strates destinées à l'avenir de l'artéfact d'autre part.

La question de la préservation des œuvres monumentales était conflictuelle et dialectique. De plus, la richesse du lexique utilisé pour décrire les opérations de conservation creusait d'avantage le débat : La conservation du bâti historique consistait-elle en un rétablissement de l'authenticité, en redonnant à l'objet un aspect initial —réel ou supposé— à travers sa purification des strates adventices ? De l'embellir et de l'actualiser au moyen de l'apport d'éléments et de techniques modernes ? Où de le maintenir en tant qu'œuvre de l'homme, de la nature et du temps ? Ces interrogations ont donné lieu à une multitude de réponses et de possibilités concevables.

Un courant de pensée initié par Viollet-le-Duc, a marqué la pratique et la théorie de la restauration du XIX^{ème} siècle. Dans son ouvrage consacré à l'architecture du moyen âge (Viollet-Le-Duc 1866) il affirmait que restaurer un bâtiment revient à le reconstituer en « *un état complet qui peut n'avoir jamais existé.* » (Viollet-Le-Duc 1858). Ce qui précède laisse entendre la recherche de l'intégralité et la cohérence d'un état de référence —avéré ou hypothétique— d'une œuvre, élargissant ainsi la panoplie des choix des opérations réalisées à ces fins : ajouts, amputation, ou remodelage de l'existant ; le but étant d'arriver à créer un tout harmonieux. Il corrobore ces propos en ajoutant que les œuvres historiques « *doivent être restaurés dans le style qui leur appartient* » tant sur le plan figuratif, que technique.

Cependant, Il insiste davantage sur le caractère stratigraphique des œuvres du patrimoine bâti avant même l'intervention de restauration, en soulignant que ces derniers ont rarement été édifiés de manière synchrone. Il précise dans ce contexte que, dans les rares cas où ces biens ont été construits selon un projet unique, planifié et exécuté d'un seul tenant, qu'ils aient « *subi des modifications notables, soit par des adjonctions, transformations ou changements...* ». À travers ce passage, Viollet-Le-Duc admet l'existence et la pertinence de la stratification comme caractère inhérent aux monuments historiques qu'il faudrait prendre en considération et assumer lors de la restauration.

Son œuvre de restauration de la basilique Sainte Marie Madeleine de Vézelay, permet d'illustrer sa pensée. Ce monument caractéristique du patrimoine architectural français, constitue un témoignage remarquable de l'évolution stylistique entre l'art Roman et l'architecture Gothique. Au-delà de sa valeur artistique, il occupe une place centrale dans l'histoire des croisades, étant directement associé à la prédication de la Seconde Croisade (1146) par Bernard de Clairvaux

et au rassemblement des souverains avant la Troisième Croisade (1190)(Jokilehto 1999). Ces caractéristiques renforcent sa valeur d'œuvre d'art et d'histoire médiévale.

Dans ses travaux de restauration, Viollet-le-Duc a fait preuve d'un profond respect pour les différentes époques historiques du bâtiment. Il a su préserver son caractère hybride, en conservant à la fois les éléments romans et gothiques qui en façonnaient l'identité. Le cachet roman se manifestait à travers les portails richement décorés et surmontés d'arcs en plein cintre, les chapiteaux sculptés et les modillons sous corniche. Parallèlement, l'héritage gothique a été mis en valeur par le pignon de la façade principale, couronné d'un arc brisé orné de statuettes, ainsi que par le chevet ajouré de vastes baies vitrées, ponctué de gargouilles et de pinacles élancés. Les figures 13 et 14 montrent la coexistence des deux styles marquant explicitement et harmonieusement la stratification historique et stylistique dans l'œuvre de Viollet-Le-Duc.

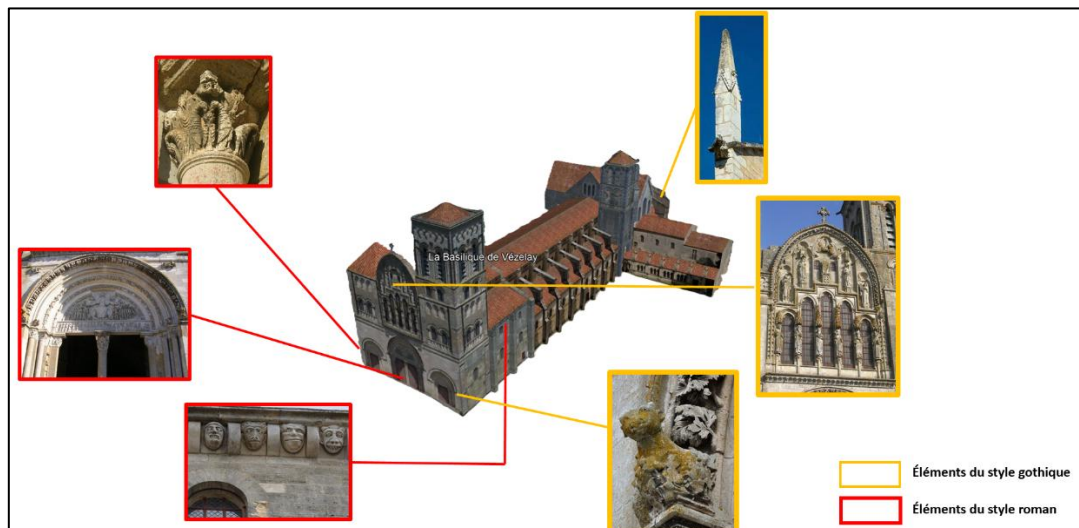


Figure 13: vue Sud-Ouest de la basilique Sainte-Marie Madeleine de Vézelay.

source : image 3D de google earth pro. traitement: auteure

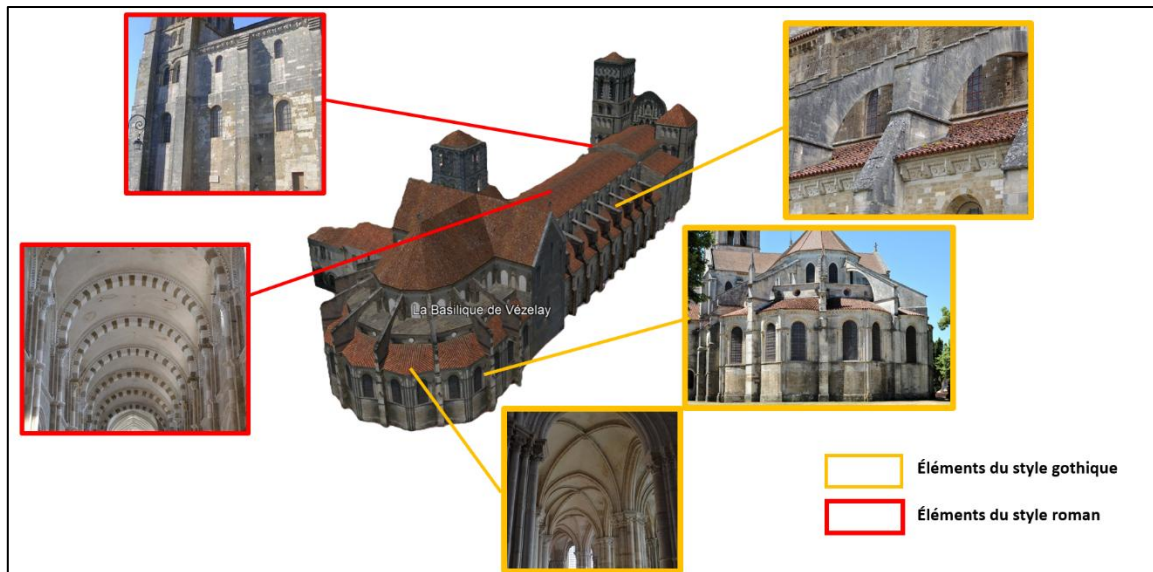
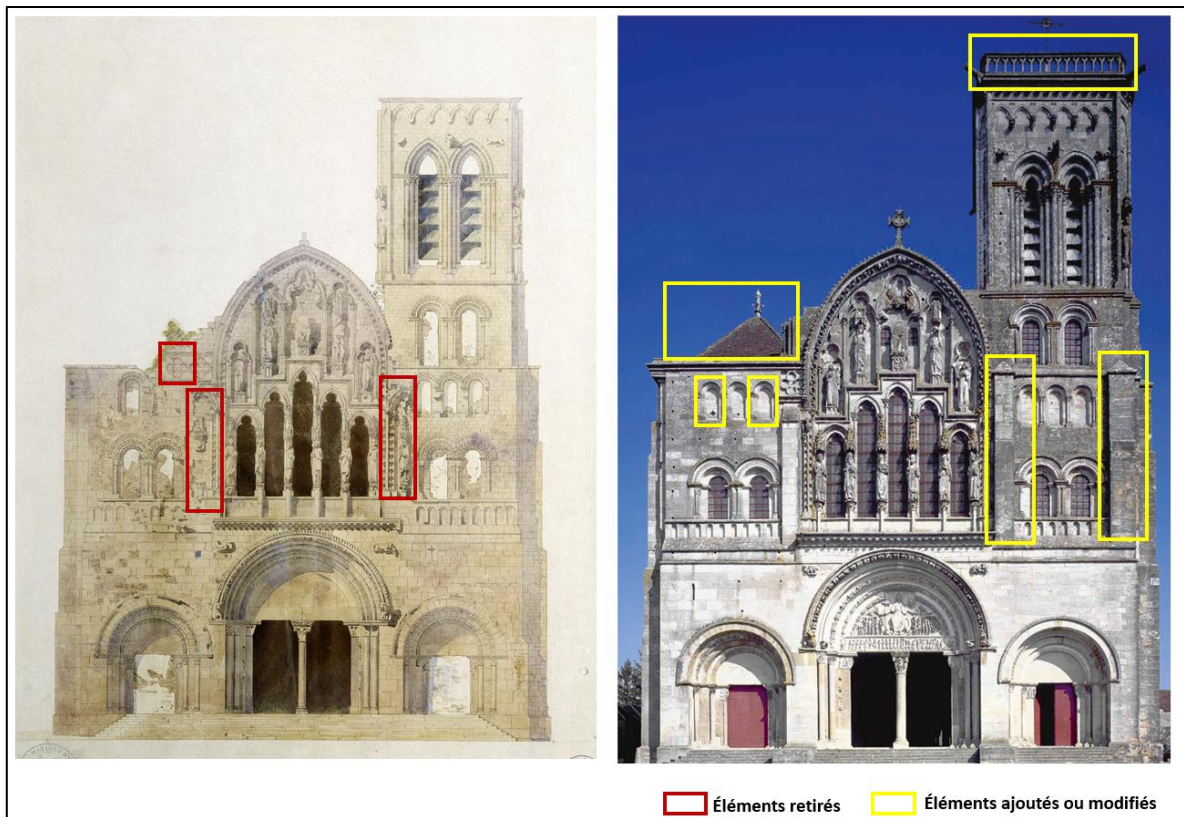


Figure 14: vue Nord-Est de la basilique sainte-Marie Madeleine de Vezelay.

source : image 3D de google earth pron traitement: auteur

Au-delà du respect de la stratification existante, Viollet-le-Duc a enrichi le bâtiment par ses interventions, en modifiant son histoire par l'ajout ou la suppression de certaines couches. Il a complété les parties inachevées en intégrant des fragments supplémentaires, notamment par la consolidation des toitures et des voûtes. Il a également épuré les façades en éliminant les éléments qu'il jugeait nuisibles à l'harmonie de l'ensemble —tels que les aménagements postmédiévaux dissimulant les parties romanes— et a procédé au retrait ainsi qu'au remplacement des éléments manquants ou fortement dégradés, tels que les chapiteaux érodés et les statues endommagées. Les figures 15 et 16 permettent de distinguer certaines opérations que l'architecte a apporté aux façades Sud et Ouest.



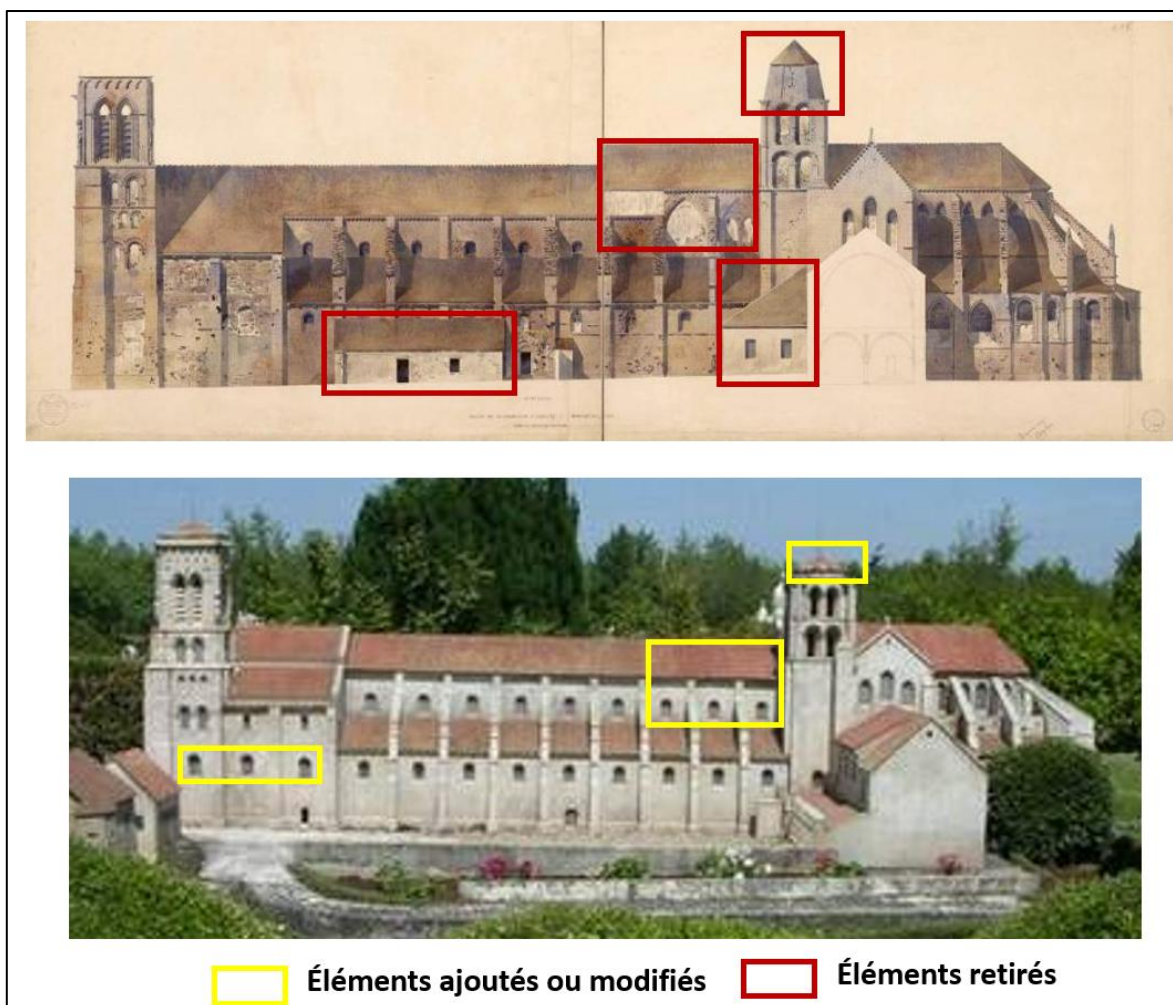


Figure 16: La façade Sud de la basilique avant et après la restauration. En haut : Relevé de la façade Sud avant les travaux du XIXe S. En bas : Vue de la façade Sud après la restauration. Traitement : auteure. Source: <https://mediatheque-patrimoine.culture.gouv.fr/> et: <https://expresionculturarte.foroactivo.com/>

Face à l'essor de la restauration monumentale au XIXe siècle, un courant artistique et intellectuel —non-interventionniste— a émergé en Grande-Bretagne sous le nom de "Arts and Crafts", chaperonné par William Morris et John Ruskin. Ce dernier rejetait fermement la restauration en tant qu'acte de préservation, qu'il considérait comme une forme particulièrement néfaste d'altération ou de destruction du monument¹². Pour Ruskin, la véritable valeur d'un monument réside dans son « authenticité » et son état de ruine naturel, qui témoignent du passage du temps. Il défendait avec ferveur, l'idée que la véritable grandeur d'un édifice, réside, avant tout, dans son ancienneté, et dans l'usure du temps, assimilant l'architecture aux œuvres de la nature(Ruskin 1889).

¹² John Ruskin, affirmait que « Ce qu'on appelle prétendument restauration, n'est que la pire façon de destruction » dans: "The seven lamps of architecture" que , Sunnyside [Eng.] : G. Allen, 1889, 314 p.

Malgré l'écho considérable de l'école de pensée romantique et du mouvement « arts and crafts », la pratique de la restauration des monuments s'est largement diffusée en Europe de l'Ouest, notamment au Royaume-Uni et en Italie, dans un contexte marqué par une sensibilité croissante à la préservation du patrimoine. Un autre exemple emblématique illustrant la pensée conservatrice du XIX^e siècle est la restauration du Colisée de Rome. Chef-d'œuvre de l'Antiquité romaine, cet amphithéâtre —dont la construction débuta au I^{er} siècle sous l'empereur Vespasien et fut achevée par ses fils Titus et Domitien— a traversé une histoire mouvementée, contribuant à l'accélération du processus de sa dégradation. Au fil des siècles, il a été soumis à divers usages inappropriés, au démantèlement systématique de ses matériaux, ainsi qu'à d'importants dommages structurels causés par une série de séismes (Jokilehto 1999). À l'aube du XIX^e siècle, son état de délabrement avancé, a nécessité des interventions d'urgence visant à préserver ce vestige emblématique de l'Antiquité.

En 1807, Raffaele Stern a réalisé une première restauration qui consistait en la consolidation de la partie Sud-Ouest de l'amphithéâtre. Son intervention portait sur le murage des arches de rive, particulièrement vulnérables, et sur l'érection d'un contrefort latéral destiné à stabiliser la structure en neutralisant les poussées. À travers cette opération, illustrée dans la (figure 17), Stern s'inscrit dans la pensée conservatrice, en préservant les parties authentiques du monument d'une part, et les effets du temps, de l'homme et de la nature gravés sur ses parements abîmés d'autre part. Bien que son intervention soit invasive, ajoutant une couche constructive et historique imposée au monument, l'austérité de cette dernière renforce la dimension métaphysique de l'œuvre, porteuse d'une essence intemporelle, d'un dialogue entre l'histoire, la matière et la nature.

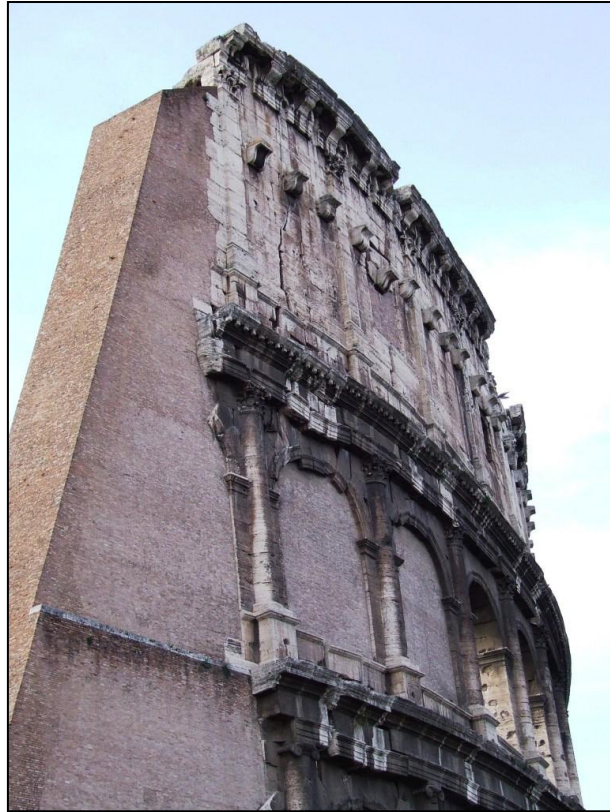


Figure 17: restauration de la partie Sud-Ouest du Colisée par Stern en 1807.

Source M. Tanguay, 2012

Une seconde restauration fut réalisée par Giuseppe Valadier en 1823 sur l'arcade Nord-Est du bâtiment. Dans son intervention, l'architecte a proposé la construction de la partie manquante à l'identique, en guise d'intégration des lacunes d'une part, et de stabilisation de la structure d'autre part. Valadier a adopté une approche minutieuse visant à restituer fidèlement l'aspect originel du monument. Il a veillé à reproduire, avec exactitude, la forme et les proportions des arcades existantes, mais aussi à préserver l'harmonie visuelle de l'ensemble, en recréant l'effet de la patine du temps sur les nouvelles surfaces, renforçant ainsi la continuité esthétique et symbolique de l'édifice (figure.18). Cette intervention s'inscrit dans le résonnement interventionniste, cherchant à restituer l'image architecturale historique, et à atteindre harmonie et durabilité.

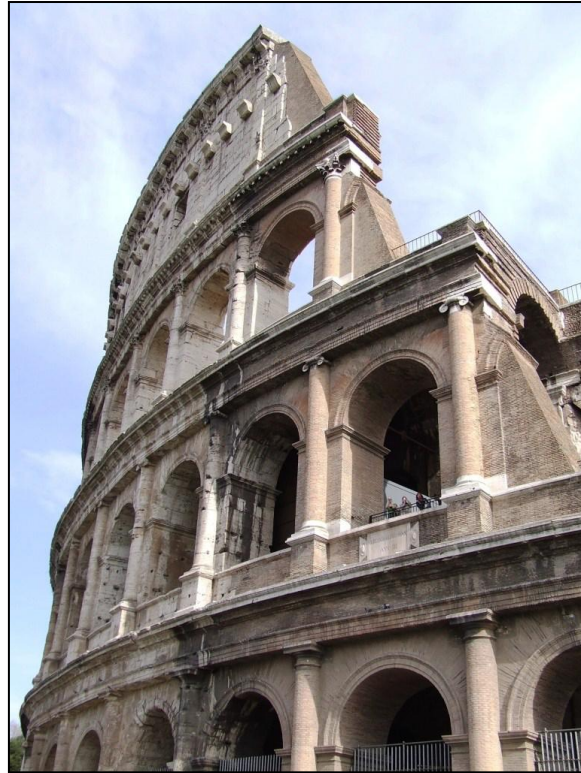


Figure 18: Restauration de la partie Nord-Est du Colisée par Valadier en 1823.

Source M. Tanguay, 2012.

1.2.4. Le patrimoine bâti dans la dynamique de la mondialisation.

La pratique restauratrice du XIX^e siècle perdurera durant le siècle suivant, et le respect des différentes strates historiques des édifices deviendra un principe fondamental alimentant la dialectique entre conservation et restauration. Au XX^e siècle, les principales théories autour de la conservation et la restauration du patrimoine bâti, se sont développées autour de la bipolarité des monuments, comme objets historiques d'une part, et œuvres artistiques d'autre part. La valeur historique justifiait alors, le respect de la stratification comme signe de diachronie et d'évolution temporelle, et ouvrait la voie à l'ajout de futures strates. Cette position était particulièrement soutenue par les partisans de la restauration historique. D'un autre côté, la dimension artistique reposait nécessairement sur l'aspect figuratif des artéfacts, engageant le débat sur la purification de l'image, souvent en créant des unités stratigraphiques négatives par retrait, ou positives par adjonction. Cette dernière approche était largement défendue par les protagonistes de la restauration critique. (Tanguay 2012)

À partir de la seconde moitié du XX^e siècle, la question de la conservation du patrimoine s'est élargie et a évolué à l'échelle mondiale, portée par l'ICOMOS, plaçant les dimensions historiques et artistiques au cœur des débats. Lors de la rencontre organisé à Venise en 1964

consacrée aux échanges et à la réflexion sur l'attitude à adopter envers les œuvres historiques, Il a été établi que les contributions apportées au fil des époques à la construction d'un monument doivent être reconnues et préservées dans leur diversité(ICOMOS 1964) —*art.11*. Dans la même lignée, le document de NARA adoptée lors de la rencontre de 1994, souligne la nécessité d'admission de la pluralité des expressions culturelles aussi bien dans l'espace bâti, que dans la connotation historique. En effet, le document présente la stratification historique et constructive comme gage d'authenticité, soulignant l'importance de valoriser toute forme de la mémoire collective de l'humanité. Il insiste également sur la place de la pluralité et la richesse culturelle, et sa manifestation tangible dans sa dimension spatiale et intangible dans sa dimension temporelle (*Art 4, 5, 6*).

En 2007, le conseil scientifique de l'ICOMOS réaffirme la place centrale de la stratification dans la '*charte ICOMOS Enane*', soulignant la nécessité de l'admission de la multi-temporalité des artefacts et des sites, et de la parité entre les différentes phases et de leurs impacts sur l'évolution du patrimoine (*Principe. 3.2*)(ICOMOS 2007).

Plus récemment, le document normatif '*Principes de La Valette*' produit en 2011, souligne la nécessité de s'appuyer sur la stratification existante des œuvres, comme cadre de référence directeur des interventions envisagées (*art. 2.b*)(ICOMOS 2011).

Au-delà de la diversité des expressions et des notions utilisées pour approcher la stratification architecturale dans les textes de l'ICOMOS [voir l'annexe A], celle-ci est omniprésente dans le débat intellectuel et professionnel. Son rôle central se manifeste tant dans l'identification des œuvres du patrimoine bâti et la définition de leurs valeurs inhérentes, que dans les approches et les interventions mises en œuvre pour assurer leur conservation.

A l'aube du XXI^e siècle, une nouvelle préoccupation s'est imposée à l'échelle internationale, dominant les discours scientifiques, économiques et politiques : le développement durable. En effet, la prise de conscience du caractère limité des ressources naturelles et énergétiques(Lerario 2022), a engendré une nouvelle attitude vis-à-vis du bâti existant, encourageant le maintien, le recyclage et la réadaptation(Stone 2019) aussi bien des matériaux, des structures, que des réserves foncières.

Sur le plan pratique, cette nouvelle perception engage un processus de récupération et de réutilisation de l'ancien bâti dans le cadre d'économie des matériaux, des énergies et des coûts. En effet, le bâti historique est reconnu comme ayant une empreinte écologique minime sur

l'environnement, notamment l'architecture vernaculaire préindustrielle. Le bâti vernaculaire des cités historiques était principalement façonné par les maîtres maçons en concordance avec les ressources naturelles disponibles, les données topographiques et techniques, ainsi qu'avec les conditions climatiques et environnementales(12e Assemblée Générale d'ICOMOS 1999). Les bâtisseurs des cités vernaculaires pensaient leurs espaces en termes d'utilisation efficace et économique, en parfaite harmonie avec les caractéristiques des sites pour une organisation optimale et une adaptation aux mœurs des usagers. Étant donné sa qualité de création populaire locale, reflétant le développement et l'organisation des sociétés, cette architecture est souvent fortement stratifiée, à cause de la réadaptation et de la réappropriation successive des lieux. La pratique de récupération et de recyclage de ces lieux dans un contexte écologique et durable, les inscrit dans un processus continu de stratification et d'évolution diachronique.

Dans cette même perspective de durabilité, est posé le problème de l'extension horizontale et l'étalement ex-nihilo des villes. Ce phénomène jugé trop consommateur en matière de ressources foncières et économiques des villes et des collectivités, pose l'alternative de la reconstruction de la ville sur la ville, par la récupération des friches urbaines, ainsi que la conservation et la réaffectation du bâti historique. Ajouté à cela, on assiste à l'importante attractivité et densité des vieilles villes, et des cités historiques, qui perdurent en dépit de l'évolution des sociétés et des pratiques individuelles et collectives. En effet, selon Sally Stone, le sentiment de rattachement social aux centres historiques, est justifié par le caractère et l'identité des lieux, façonnés par l'écoulement des siècles et des événements qui les ont marqués(Stone 2019). Ce sentiment d'appartenance, conjugué à l'accélération de la dégradation des tissus urbains anciens, justifie le recours croissant à des pratiques de recouvrement et de reconstruction, souvent superposées à l'existant. Cette résilience renforce l'omniprésence de la stratification en tant que trace tangible de la continuité temporelle intergénérationnelle.

Conclusion du chapitre premier :

Ce chapitre a été consacré à une approche génétique du concept de stratification, en tant que phénomène omniprésent dans les œuvres du patrimoine bâti. La recherche s'est focalisée sur le périmètre circumméditerranéen, regroupant des régions ayant historiquement et culturellement influencé —directement ou indirectement— le développement architectural et les pratiques constructives en Algérie.

L'exploration des traditions et savoir-faire des bâtisseurs autour du bassin méditerranéen, a permis de retracer les origines de la stratification : apparue d'abord comme un acte spontané, elle s'est progressivement imposée comme une œuvre consciente et délibérée. Cette configuration, observable dans les œuvres patrimoniales, résulte d'une succession d'interventions constructives, alternant des phases de constance et de transformation, ayant profondément influencé leur morphologie, leur structure et leur spatialité.

Sur le plan pragmatique, la stratification, apparente sur les artéfacts, constitue l'incarnation matérielle de leur historique constructif et morphologique. Elle révèle un processus diachronique, complexe et évolutif, de transformation des espaces tout au long de leur existence.

À partir de ces données, le bâti historique stratifié, peut être conçu comme une entité constructive diachronique, composée d'unités synchroniques liées entre elles par des rapports topologiques et chronologiques. Chaque transformation, à l'origine de la création d'une nouvelle strate, est motivée par une intention constructive ou un événement historique : réappropriation, expression de suprématie, nécessité fonctionnelle ou volonté de préservation. Autant de facteurs sont à l'origine du phénomène de stratification architecturale.

Compte tenu de son caractère à la fois omniprésent et structurant dans les artéfacts historiques, la prise en compte de la stratification comme donnée essentielle dans le domaine de la conservation du bâti patrimonial s'impose donc comme une nécessité. De nombreuses méthodes issues de paradigmes et de disciplines variés, ont contribué à l'étude de ce phénomène.

Le chapitre suivant sera consacré à l'examen des principales approches scientifiques connues, afin d'en dégager les apports, les limites, ainsi que les besoins encore à explorer concernant la compréhension et la prise en charge de la stratification.

Deuxième chapitre : La stratigraphie architecturale : une approche scientifique de la stratification du bâti historique

Introduction du chapitre :

Comme cela a été exposé dans le chapitre précédent, la stratification apparaît comme une caractéristique prépondérante, occupant une place centrale dans l'environnement bâti patrimonial. Quelle que soit sa forme, son étendue ou sa motivation, elle exerce un impact notable, tant sur le plan structurel que figuratif et sémantique. En effet, le processus de transformation à l'origine de la stratification — qu'il s'agisse d'ajouts, de retraits ou de déformations — entraîne des modifications profondes : il redistribue les charges et modifie le comportement structurel, remodèle l'apparence visuelle et esthétique, et redéfinit le système de valeurs symboliques ou culturelles associées à l'édifice.

L'omniprésence de ce phénomène dans le patrimoine bâti a conduit à l'introduction de l'étude stratigraphique — initialement développée en géologie — dans les disciplines de l'archéologie, puis de l'archéologie du bâti.

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les différentes méthodes qui ont marqué l'analyse et l'interprétation de la stratification architecturale, ainsi que leur évolution au fil des avancées méthodologiques et technologiques en architecture et en patrimoine bâti.

2.1. La stratigraphie de déposition classique : une approche issue des sciences de la terre :

La stratigraphie, en tant que science de l'étude de la stratification, s'est développée au cours du XVIII^e siècle, dans le sillage de l'essor intellectuel des Lumières. L'émergence de la géologie, discipline de l'exploration de la nature et de la structure des profondeurs telluriques, a mis en évidence la composition stratifiée de l'écorce terrestre formée de couches successives, déposées par sédimentation gravitaire.

Ces couches, appelées strates, sont généralement disposées parallèlement en lits géologiques. Elles se distinguent par leurs caractéristiques spécifiques — fossiles, minéraux, nature, texture ou couleur — qui permettent leur identification et leur datation relative.

La stratigraphie archéologique, directement liée aux pratiques en profondeur de fouille et d'excavation des gisements archéologiques, s'est construite sur les fondements méthodologiques de la stratigraphie géologique. La lecture verticale des dépôts et le principe de superposition — selon lequel les couches les plus profondes sont les plus anciennes — ont constitué les axiomes fondamentaux de cette approche. Ces principes ont guidé les différentes écoles et courants de pensée qui ont structuré la discipline stratigraphique archéologique.

Toutefois, si la stratigraphie archéologique est une méthode destructive visant l'étude des formes d'installations humaines et sociétales enfouie en profondeur, la stratigraphie architecturale, quant à elle, est une approche non invasive destinée à reconstituer et à comprendre la genèse spatio-morphologique et historique des œuvres du patrimoine bâti. En outre, la méthode stratigraphique archéologique intègre, dans son analyse, à la fois les couches sédimentaires naturelles — les écofacts — et les productions anthropiques — les artefacts mobiliers et immobiliers. À l'inverse, la stratigraphie architecturale se limite à l'étude des objets bâtis et des éléments architecturés.

2.1.1. Méthodes pré-stratigraphique d'étude des structures diachroniques et multicouches :

Comme souligné au chapitre précédent, les bâtiments historiques stratifiés étaient des spécimens courants dès l'antiquité. Ainsi, dès la naissance de la perception des œuvres du passé comme productions issues de contextes temporelles détachés du présent, la pratique de datation, et de classification temporelle et historiques des diverses composantes du patrimoine bâti, s'est installée.

Les courants intellectuels et spirituels de la renaissance, ont introduit une nouvelle perception des temps passés. De nouveaux champs de connaissances ont émergé ayant pour objet d'étude le bâti historique et les productions artistiques des anciens, mettant en évidence le rapport entre artéfacts et évolution temporel.

A partir du XVI^{ème} siècle, le développement de la philologie, l'épigraphie, et le recueil et la critique des textes anciens par les antiquaires de l'époque, engendrent un nouveau regard sur les vestiges antiques, et leurs confère un nouveau statut. En effet les spécialistes trouvent dans les artéfacts antiques des illustrations et des preuves concrètes corroborant —ou au contraire contredisant — les écrits historiques des ancêtres, et apportant un complément d'informations et de connaissances sur les civilisations, les cultures, et les pratiques constructives et urbaines du passé. Les inscriptions sur les monuments et les gravures découverts lors des fouilles, représentaient des sources d'érudition supplémentaires, authentiques et probantes, permettant de situer temporellement les différents édifices et éléments architecturaux. Ainsi, pour les intellectuels de la Renaissance, les œuvres du patrimoine bâti représentaient le document historique par excellence, dans lequel les matériaux et leur agencement étaient jugés plus expressifs que les mots et la rhétorique des textes anciens(Desachy 2008a). En effet le style utilisé, le niveau de détails, la précision ou l'absence des représentations graphiques dans les documents écrits ouvrent la voie à des interprétations divergentes lors des différentes lectures d'un document. Ainsi, l'évolution de cette pratique philologique a générer la pratique de la documentation de l'évolution stylistique et architecturale à travers les civilisations, attribuant au legs des anciens le caractère d'œuvre temporellement délimitée et faisant appel aux connaissances de spécialistes(Desachy 2008a). Là où les descriptions communiquées textuellement par les anciens, décrivaient les contextes historiques, temporels et socio-économiques des communautés, les documents en pierre donnaient un tableau vivant aux productions architecturales historiques, et aux organisations spatiales et urbaines des anciens.

Parallèlement, avec la découverte d'Herculanum et de Pompéi, au XVIII^{ème} siècle, décrites dans les récits de Pliny(GRELL 1982), l'exploitation des vestiges prend une nouvelle tournure et devient, alors, une quête méthodique de connaissance des civilisations ancestrales, de leurs installations, leurs cultures matérielle et immatérielles, et également leurs pratiques sociales et culturelles. Les œuvres du passé considérées alors, comme traces tangibles des anciens, permettaient de vérifier, de recouper et de compléter les informations transmises par les textes antiques, et de pouvoir visualiser l'organisation des sociétés et des lieux disparus. L'exemple de l'archéologue autodidacte H. Schliemann, lors de sa quête de la ville de Troie au XIX^{ème}

siècle, reste à ce jour, l'un des exemples les plus parlants du rapport entre les écritures mythiques des anciens et l'identification et la datation des traces matérielles. En effet, l'archéologue avait lancé un chantier de fouille colossal en se basant principalement et exclusivement sur les épopées d'un poète grec du VIII^{ème} Av- JC : *l'Odyssée* et *l'Iliade* d'Homère. Lors des fouilles entreprises en 1870 sur le site d'Hissarlik, les vestiges de cités empilés furent exhumés, dont l'un des paliers fut attribué à la Troie Homérique(Desachy 2008a), et datée par les chercheurs comme appartenant à l'époque entre 1250 et 1180 av. J.-C. Des recherches complémentaires, fondées sur des mises en rapport topologiques et architecturales, et des investigations historiques, ont permis de mettre en évidence neuf phases d'occupation du site. Celles-ci incluent des établissements antérieurs et postérieurs à la Troie d'Homère, retraçant ainsi l'histoire de la région depuis environ 2500 av. J.-C. jusqu'à la fin du IV^e siècle de notre ère. (figure.19)

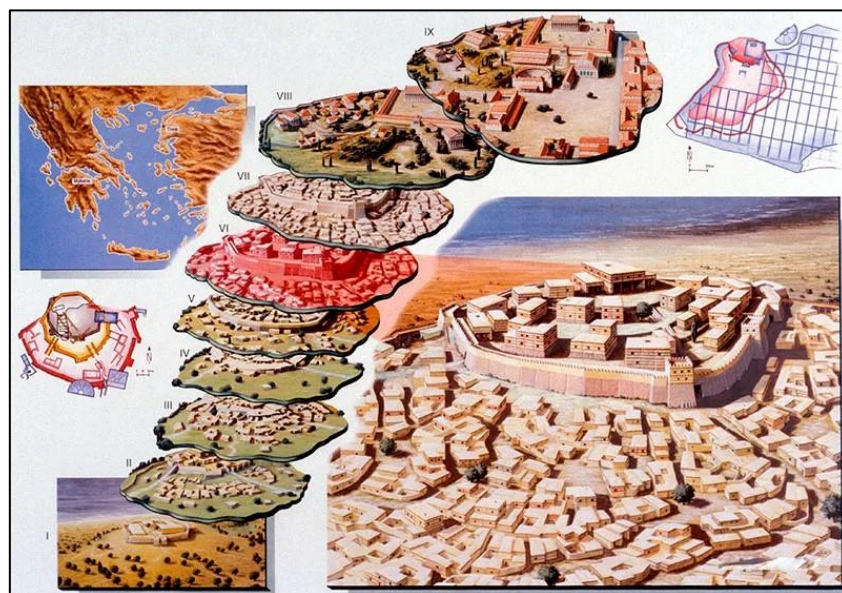


Figure 19: les différents paliers d'occupation du site d'Hissarlik, avec la reconstitution hypothétique de la Troie d'Homère.

Source : Christoph Haußner, München, 2004

Dans le même contexte, durant la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, lors des travaux d'expédition scientifique lancés par l'administration française sur le territoire Algérien en quête de l'héritage romain, la méthode du recoupement entre vestiges et textes anciens, a été utilisée dans plusieurs recherches. Le travail effectué par la société archéologique de la province de Constantine pour l'étude du pont El-Kantara, à l'entrée Est de la ville, permet d'illustrer les écrits d'El Idrissi datant de son voyage en Algérie au XII^{ème} siècle, où il décrit un pont romain à l'entrée de l'antique Cirta(Iḍrīsī 1250). Ceux-ci ont été croisés avec les résultats des

explorations in-situ où ont été découvertes des inscriptions renvoyant les origines de la construction au règne d'Antonin le pieu de l'an 138 à l'an 161 AP J-C (BERBRUGGER 1857).

La (Figure.20) présente une illustration des informations recueillis dans les textes des anciens.

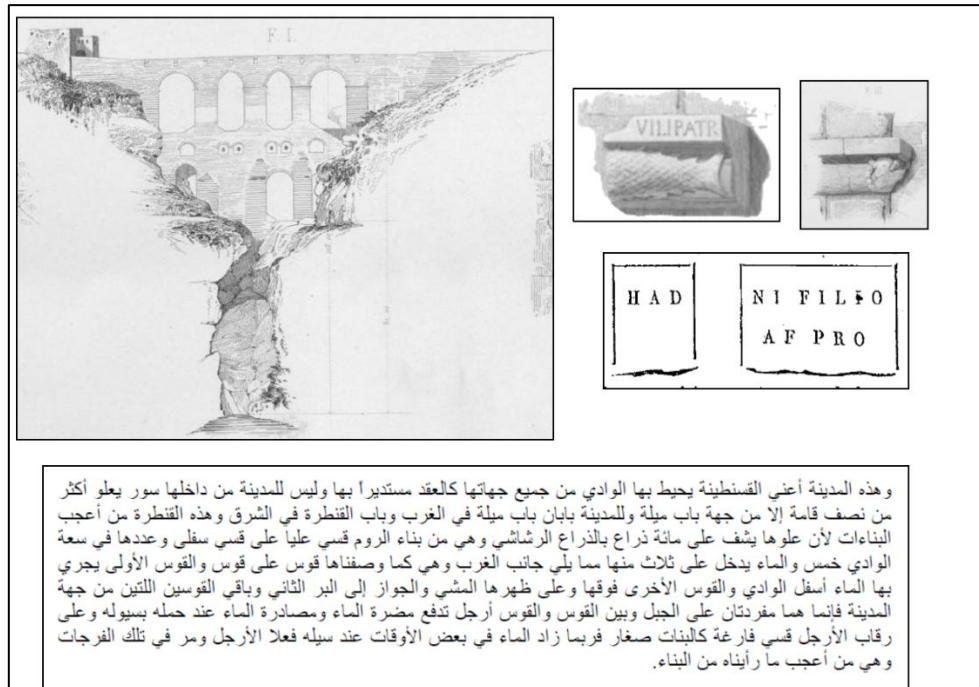


Figure 20: Recouplement de la recherche documentaire philologique et de l'exploration des vestiges in-situ. En haut : croquis de l'élévation sud du pont sur le ravin et des inscriptions relevées.

Source : Delamarre 1840-1845. En bas : copie du texte originelle d'Al idrisi de décrivant le pont. Source : El Idrissi :1250

Avec l'évolution du mouvement rationaliste des lumières, cette culture historique matérielle connaîtra des renouvellements méthodologiques ouvrants la voie à l'approche dite typologique en sciences humaines. Les vestiges bâtis étaient analysés en termes de similitudes et de divergences, et classés par ordre chronologique, « *les variations de caractères morphologiques et techniques exprimant une évolution dans le temps* » (Desachy 2008a). L'élaboration de classifications des artefacts anciens, par ordre chronologique, a permis de faire des études comparatives et d'établir des langages stylistiques afférents aux différentes civilisations historiques. Les travaux de Quatremère De Quincy, en typologie architecturale, ont permis de mettre à jour de nouveaux langages stylistiques en dehors de l'architecture classique (Guney 2007). L'approche typologique était utilisée aussi bien à l'échelle du bâtiment, qu'au niveau de ces composantes. En effet, en plus de l'étude comparative des édifices en tant qu'entités, la typologie s'est intéressée à l'analyse des éléments architectoniques et constructifs, aux formes

géométriques, aux types de matériaux utilisés, ainsi qu'aux techniques et modalités de mise en œuvre.

Cette nouvelle pratique a favorisé la prise de conscience d'un passé diachronique marqué par des expressions culturelles matérielles typiques, et a ouvert le champ à l'étude de l'archéologie du bâti, l'histoire de l'architecture et de l'art. Plusieurs travaux des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles, furent consacrés à l'étude approfondie des types architecturaux synchroniques successifs, tels que les travaux de Viollet-Le-Duc, consacrés exclusivement à la typologie architecturale et constructive du moyen âge (Viollet-Le-Duc 1866).

Les études philologiques et typologiques représentent les prémisses de l'étude du caractère diachronique du patrimoine bâti, ainsi que de sa structuration en couches successives dans les œuvres historiques. Toutefois, ces approches méthodologiques se concentraient essentiellement sur la catégorisation synchronique des différentes composantes, sans interroger leurs relations mutuelles, ni la logique d'ensemble de leur composition stratifiée. Ce n'est qu'avec l'émergence de la notion de stratigraphie en géologie moderne, puis son intégration en archéologie, que l'analyse stratigraphique a commencé à être appliquée à l'architecture historique.

2.1.2. L'approche stratigraphique d'inspiration archéologique pour le patrimoine bâti :

La méthode Harris pour la stratigraphie archéologique :

L'introduction de la vision stratigraphique en archéologie résulte du développement de la stratigraphie géologique, et plus particulièrement de la paléontologie. En effet, l'évolution de cette discipline a marqué le passage de l'étude typo-chronologique des éléments constitutifs de chaque strate, vers la mise en corrélations topologiques et chronologiques entre ces différentes couches. Étant donné la fréquence des vestiges à caractère artéfactuel présents dans les couches géologiques — tels que l'outillage préhistorique — la discipline archéologique a progressivement intégré l'approche stratigraphique à partir du XX^e siècle, tant dans la pratique de la fouille que dans l'interprétation des occupations humaines. Ainsi, les axiomes et les principes méthodologiques issus de la stratification géologique, ont été transposés et adoptés comme fondements épistémologiques de la stratigraphie archéologique, partant du postulat selon lequel les gisements archéologiques s'inscrivent plus globalement dans les substrats géologiques régionaux. Dans cette optique, les archéologues ont adopté la règle de l'accumulation gravitaire en niveaux superposés, postulant l'ancienneté des couches les plus profondes. Par ailleurs, ils se réfèrent également, au principe de la déposition horizontale, supposant une formation des strates sous forme de couches relativement

homogènes, linéaires et parallèles au sol, sur l'ensemble de leur étendue. Cette vision a été renforcée par les retours d'expérience issus de sites préhistoriques, notamment dans les contextes de groupements pré-urbanisés, où la corrélation entre contexte sédimentaire et vestiges mobiliers confirmait une formation stratifiée ascendante.

À partir de la seconde moitié du XXe siècle, deux approches systématiques majeures vont émerger. La première est celle de la stratigraphie strictement verticale, initialement développée par Mortimer Wheeler et Kathleen Kenyon, souvent considérée comme une transposition littérale des principes de la stratigraphie géologique(Desachy 2008a). Cette méthode en « carré de fouille » se base principalement sur l'organisation du chantier en quadrillage régulier : des fosses carrées sont creusées en profondeur, séparées par des bermes intermédiaires à intervalles régulier afin de faciliter la circulation et la mobilité dans le site. (Figure. 21)



Figure 21: Méthode de fouille et de lecture stratigraphique verticale. Système Wheeler-Kenyon.

Source: Leiden University: Research projects [Tell Sabi Abyad \(Syria\) - Leiden University](#)

Dans cette approche, la lecture stratigraphique s'effectue perpendiculairement aux parois des carrés, mettant en évidence l'organisation verticale des couches. L'enregistrement des données stratigraphiques se réalise de manière ponctuelle à partir des différentes coupes, permettant ensuite, une reconstitution globale de la formation du site par extrapolation et extrusion des observations soulevées sur chaque section verticale.

Dans la méthode Wheeler-Kenyon(Harris 1989), la coupe dite de référence(Desachy 2008a) constitue l'outil central pour la lecture, la collecte, et la représentation des données stratigraphiques. Les niveaux identifiés comme entités homogènes, sont définis exclusivement,

sur la base de leur composition sédimentaire naturelle, écartant ainsi toutes considérations liées aux éléments culturels ou aux productions anthropiques, perçus comme anomalies et perturbations du relief.

Si la méthode de stratigraphie verticale a été largement diffusée et couramment appliquée dans les travaux d'excavation des sites archéologiques, ses limites sont rapidement apparues dans le contexte des sites urbains fortement densifiés. En effet, avec le développement de l'archéologie urbaine et préventive, ainsi qu'avec la généralisation des fouilles en aires ouvertes au milieu du XX^e siècle, la lecture morcelée fondée sur des coupes de référence discontinues, s'est révélée insuffisante pour appréhender la complexité organisationnelle des ensembles urbains denses et fortement aménagés.

Face à cet obstacle méthodologique, la lecture horizontale fondée sur l'établissement de plans superposés a été adoptée au détriment de la vision verticale en coupes de référence. Le travail d'excavation et de fouille in situ, a été réorganisé, en lecture horizontale et progressive des couches de stratification, par décapage graduel et identification successive des différents niveaux des sols d'implantation des groupements anthropiques. Dans cette méthode, l'enregistrement et la représentation des ensembles stratigraphiques identifiés se fait sur plans de contextes et plans d'aménagement des lieux (Figure.22). Les coupes ne sont cependant pas, complètement abandonnées dans cette approche, mais s'effectuent sur la base des différents plans réalisés, à travers superposition, recoupement, et projection.



Figure 22: Méthode de fouille et de lecture stratigraphique horizontale en aire ouverte.

Source: [Roman Archaeology - Buckalew's Latin Projects](#)

C'est dans ce dernier contexte, que fut développée dans les années 1970 la méthode Harris, reconnue comme étant l'état de l'art en matière de stratigraphie archéologique. En effet, la méthode de lecture horizontale en plans cumulés posait des difficultés dans le traitement des données stratigraphiques en raison de l'abondance et de la complexité des informations répertoriées en plans. Face à ces limites, Dr Edward C. Harris a proposé une systématisation de la méthode stratigraphique en aires ouvertes, visant à rationaliser l'ensemble du flux de travail, de la collecte des données sur terrain, jusqu'à leurs représentation, enregistrement et interprétation. Il développe alors, une conceptualisation ad-hoc à la stratigraphie archéologique considérée comme géodynamique façonnée par l'intervention humaine, en définissant des concepts-clés fondés sur des règles la régissant.

Les règles de la stratification archéologique :

La théorie d'Edward C. Harris est fondée autour de quatre principes fondamentaux (Harris 1989):

- *La loi de superposition* : stipule que la formation d'un site se fait par déposition et entassement graduel en élévation de strates successives, composées d'éléments naturels et artéfactuels. Cette loi énonce un processus cumulatif qui est à l'origine du phénomène de la stratification. Il est important de noter que la loi de superposition permet de documenter uniquement les rapports mutuels entre les unités soit '*directement en dessous*', ou '*directement au-dessus*', ce qui ne permet aucunement d'informer l'ordre d'occurrence des couches en question dans la séquence globale de formation de la stratification du site.

- *La loi de l'horizontalité originelle* : selon ce principe, chaque nouvelle couche vient reposer de façon plane et uniforme sur les contours topographiques préexistants, tout au long de son étendue, dans un ordre naturel de déposition suivant les lois de la physique. Toutefois, dans un contexte anthropisé, les interventions humaines —notamment la construction de structures et les aménagements des espaces— perturbent cette planimétrie initiale en modifiant localement le relief du sol. Harris qualifie ces perturbations de « bassins de déposition », où les sédiments et vestiges peuvent s'accumuler selon des dynamiques naturelles et anthropiques ultérieures.

- *La loi de la continuité originelle* : elle postule que toute strate se déploie de façon continue sur toute son étendue, en s'amenuisant progressivement vers ses extrémités. Comme soulevé dans la loi précédente, cette continuité naturelle peut être interrompue ou tronquée par la présence d'objets culturels manufacturés. Dans ce cas, la continuité ne peut être lue que de façon fragmentaire par inférence.

Ces trois premières lois sont héritées de la théorie géologique. Comme dans la méthode Wheeler-Kenyon, celles-ci sont basées sur le fait de l'inscription des gisements archéologiques dans une dynamique géologique plus globale.

Prenant en compte le rôle des artefacts et d'interventions anthropiques comme facteurs de mise en forme du relief, et de la morphologie des sites, Harris introduit une quatrième loi, propre à la stratigraphie archéologique en aire ouverte :

- La loi de la succession : cette règle introduit une dimension chronologique à la dimension physique préalablement abordée dans les trois premières lois. Elle permet de situer le contexte stratigraphique d'une strate, au sein de la séquence chronologique de déposition du site, en la positionnant entre les couches étant directement en contact avec elle. La stratification archéologique est lue dès lors, par l'identification des rapports 'antérieur à' et 'postérieur à' entre deux couches successives. Cette loi permet la restitution de l'ordre d'occurrence et d'enchaînement des différentes entités, en les insérant dans le processus génétique du site. Il est nécessaire de souligner toutes fois, que malgré la prise en considération des éléments artefactuels du site, l'ordre de succession est déterminé exclusivement par la position des couches, et non par l'examen de leurs contenu

Partant de ce qui précède, Harris détermine la stratification comme un « *phénomène récurrent de déposition et de dégradation* » (Harris 1989), qui peut être décrit par l'identification de ses composantes élémentaires, suffisantes pour sa description. Harris a élaboré ainsi, un système conceptuel structuré destiné à la lecture, à l'analyse et à la reconstitution de la séquence stratigraphique du site. Il y intègre des outils opérationnels, visant à faciliter la gestion et l'organisation du flux de travail, en vue d'une interprétation rigoureuse.

Les éléments de lecture de la stratification :

La stratigraphie archéologique telle que conçue par Harris est l'étude du processus systématique de la formation des sites focalisée sur la genèse matérielle des dépôts, et non sur l'évolution des sociétés passées et de leurs modes d'existence. Dans cette logique, Harris a représenté la stratification comme un ensemble d'*unités stratigraphiques* constituant les composantes élémentaires d'un site archéologiques, liées entre elles par un nombre limité et défini de *rapports stratigraphiques*

Les unités de stratification : peuvent être comprises comme les modules fondamentaux et les briques de base de la stratification. On distingue deux principaux types, les couches, et les interfaces.

- Les couches correspondant aux masses ou volumes composées de dépôt sédimentaires et archéologiques, s'étalant sur une étendue donnée.
- Les interfaces, quant à elles, sont classées par Harris, en deux catégories : les interfaces de creusement, qui désignent les traces observables des périmètres limitrophes de structures disparues (fosses, tranchées...). Le deuxième type sont les interfaces —de strate— déterminées comme les bornes abstraites marquant la discontinuité entre des couches de déposition différentes.

Les rapports stratigraphiques : ils servent à décrire les positions relatives et l'ordre d'occurrence des différentes unités stratigraphiques composant le site. En partant de l'observation directe de stratification lors des travaux d'excavation, et suivant les principes de la stratification archéologique, trois types de rapports stratigraphiques ont été définis : superposition entre deux couches ; corrélation par égalité qui relie deux unités séparées mais appartenant initialement à une même entité stratigraphique ; et unités séparées ou de relations incertaines. Ces trois types de rapports peuvent être interprétés, dans une perspective chronologique, au sein de la séquence stratigraphique en termes d'antériorité-postériorité, ou de relations de synchronisme.

Les outils de représentation, d'enregistrement et d'interprétation de la stratification :

Pour la lecture, l'enregistrement, et l'exploitation ultérieure des résultats de la fouille des sites, plusieurs supports sont introduits par Harris, pour l'organisation et l'optimisation du flux de travail

Les documents graphiques : il s'agit principalement d'un ensemble de plans, complétés par des sections verticales, effectués lors des travaux d'excavation, et à leur issue. Ces dessins constituent les supports fondamentaux sur lesquels sont identifiées, codifiées et représentées les unités stratigraphiques observées sur le terrain (Figure. 23).

- Les plans sont composés de vues en plan de masse, représentant l'organisation spatiale d'un contexte dégagé pendant la fouille. Ils permettent de représenter l'ensemble du site en vue horizontale —ou topographique— à un moment (t_x) de l'avancement des travaux.

Plusieurs types de plans peuvent être établis : plans d'un contexte stratigraphique unique ; plans composites de plusieurs contextes ; ou plans de structures anthropiques.

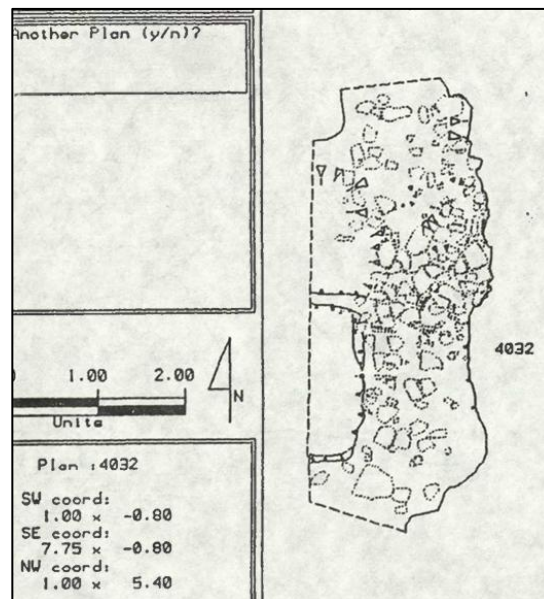


Figure 23: Un plan de contexte unique.

Source : Alvey, B. and J. Moffett 1986

- Les sections ou coupes de références (figure. 24), sont alors des représentations secondaires, destinées à étayer, ou compléter les vues en plans. Inversement à ces derniers, les coupes traduisent la séquence diachronique du site, en illustrant la succession des unités au fil du temps. Différents types de sections peuvent être réalisés : coupe en élévation lue perpendiculairement aux rebords de la surface excavée ; les coupes accidentelles bien que non planifiées, offrent des informations utiles à la compréhension du site ; et enfin, la coupe cumulative qui constitue une synthèse graphique de plusieurs observations ponctuelles, et ne repose pas sur une observation directe d'une section réelle, mais sur une reconstitution stratigraphique globale.

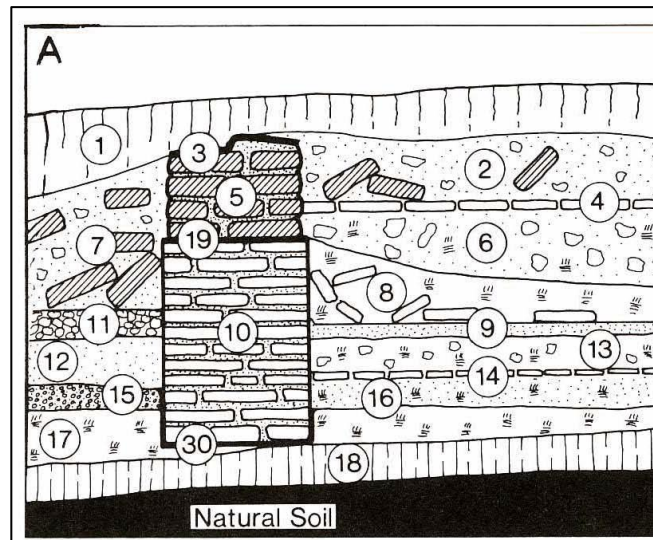


Figure 24: Une section verticale ou coupe de référence.

Source : E. C. Harris 1989

Les fiches d'enregistrement et de documentation des unités :

En plus de la transcription par le dessin des contextes individuels (*single context plans*) tel que défini par Harris, ce dernier propose un système d'enregistrement des informations recueillies lors de l'excavation. Les unités stratigraphiques identifiées à travers une inspection visuelle minutieuse du site de fouilles, sont consignées dans des fiches de renseignement spécialement conçues à cet effet. Ce mode d'organisation du travail, permet une inscription rigoureuse et un archivage méthodique des données, garantissant une exploitation optimale et une restitution exhaustive, sans perte d'information ni confusion. Chaque fiche assure la sauvegarde des données essentielles relatives à une unité ou un contexte unique : rapports physiques avec les entités voisines, coordonnées, dimensions, observations spécifiques, etc., comme c'est illustré dans la figure 25.

CONTEXT RECORDING SHEET

Grid Square(s) 11 SE / 20 SN	Area/Section 1	Context type Fill	Site Code MRG	95	Context 123
---------------------------------	-------------------	----------------------	------------------	----	----------------

DEPOSIT

1. Compaction
2. Colour
3. Composition / Particle size (over 10%)
4. Inclusions (under 10%)
5. Thickness & extent
6. Other comments
7. Method & conditions

Unit description

1. Spangly
2. Dark Reddish Brown
3. Sandy Silt (Humic layer, fibrous)
4. Sand (S/L). Fibrous material (30%)
5. Silt (S/L)
6. Fibrous layer of wood, occasional
7. Jumps of chalk approx 8mm x 5mm
8. Charcoal lumps occasional 5mm x 10mm
9. very occasional round pebbles (approx 10mm)
10. Deeper or shallower End(?) horizon in deposit
11. Sharp and smooth
12. Max Depth: min Depth:
13. Contour is 156cm by 130cm
14. Possible woods full (buttery waste etc horns)
15. Moulded

CUT

1. Shape in plan
2. Corners
3. Dimensions/Depth
4. Break of slope-top
5. Sides
6. Break of slope-base
7. Base
8. Orientation
9. Inclination of axis
10. Truncated (if known)
11. Fill nos
12. Other comments
13. Draw profile overleaf

Stratigraphic matrix

122	123	124	125	126	127	128	129	130
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

This context is 123

Operative decision

Stratigraphy

Spatial

Your interpretation: Internal External Structural Other (specify)

Feature

Formation process

Your discussion: Fill of wooden linear pit, this is a characteristically industrial fill plenty of animal bone and oxicapred horns, possible waste pit?

Reflexivity No roads or scraps of leather found so difficult for tanning, poss. suggests near by butchery or food preparation.

Context same as:

Plan nos: P (X) **Site book refs:**

Other drawings: S/E **Matrix location:**

Photographs: ☐ **Card nos:**

Initials & date: SC 14/1/99

Checked by & date: M 22/3/99

Levels on reverse

Tick when reduced and transferred to plans: ☐

Highest: 9-18 Lowest: 8-87

Environmental samples

Sample nos & type: 20 10 LK

Findings (tick)

None	Plat	Bone	Glass	Metal	CBM	BM	Other	Lead
☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒

Other finds (specify): OYSTER SHELS FREQ VENT

Findings sample BM nos:

Findings sieving: on site ☐ off site ☐ **Metal detecting:** in situ ☐ on site ☐ off site ☐

Checked interpretation:

Figure 25: Exemple d'une fiche d'enregistrement des unités/ contextes stratigraphiques.

Source : G. Sandoval 2021

La matrice Harris pour l'enregistrement de la séquence stratigraphique du site :

Le principal apport de la méthode Harris à l'étude stratigraphique, est probablement, l'introduction du séquençement relatif des différentes entités stratigraphiques identifiées in-situ (Hoggett, Richard 2000) (Harris 2017). Partant des difficultés liées à l'enregistrement et la représentation de l'ensemble des unités et des rapports stratigraphiques identifiés —en raison de leur nombre et de leur diversité— Harris a proposé l'abstraction des différentes entités définies —unités et rapports stratigraphiques— sous la forme d'un graphe orienté acyclique ascendant, connu sous le nom de matrice de Harris (*Harris Matrix*).

Dans ce système, chaque unité stratigraphique observée sur le terrain est représentée par un nœud, identifié par un code numérique unique, correspondant à son identifiant sur les plans et les coupes (Haouacha, Ravaglia, et Boufenara 2025). Les relations entre les unités sont traduites graphiquement par des arêtes verticales, qui expriment les rapports de superposition ou de

postériorité (de bas en haut), et des arêtes horizontales, qui expriment une continuité stratigraphique initiale ou un synchronisme(Traxler et Neubauer 2009).

Étant donné la complexité morphologique et spatiale de la stratification sur les sites archéologiques, la matrice de Harris prend souvent une forme multilinéaire(Harris 1989). La matrice résulte de l'intégration de diagrammes partiels élaborés localement au fur et à mesure de l'avancement des fouilles, à partir du remplissage d'une grille préétablie. Une synthèse de ces graphes est ensuite effectuée à l'issue du travail sur terrain, selon les principes de la loi de succession. Cette opération permet de relier l'ensemble des unités stratigraphiques par transitivité et suppression des redondances, pour aboutir à une représentation cohérente et hiérarchisée de la totalité de la séquence stratigraphique du site. Le processus de construction du séquençement stratigraphique est schématisé dans la Figure.26.

Il est indispensable de noter que les relations stratigraphiques sont établies exclusivement sur la base des quatre lois de la stratification archéologiques prédéfinies par Harris. Aucune donnée de nature historique ou analytique des artefacts contenus dans les couches ne doit être prise en compte à ce stade. L'analyse post-fouille effectuée par la suite, repose principalement sur l'exploitation de la matrice stratigraphique générée, associée aux analyses typologiques et historiques des vestiges recueillis dans les différentes strates pour l'interprétation de l'historique d'occupation anthropique du site(Roskams 2020) (Taylor et May 2024). Les nœuds de la matrice — représentant les unités stratigraphiques — sont alors regroupés en sous-ensembles cohérents, correspondant à des activités, des phases d'occupation ou des périodes chronologiques précises(Discamps et al. 2023). Cette structuration se fait par l'intégration de la matrice dans des fenêtres temporelles ou des cadres chronologiques de référence, permettant une lecture diachronique des parcours historique et civilisationnels du site.

La figure.27 synthétise la théorie de la stratigraphie archéologique telle que définie par E. C. Harris, et adoptée ultérieurement dans l'étude du bâti historique

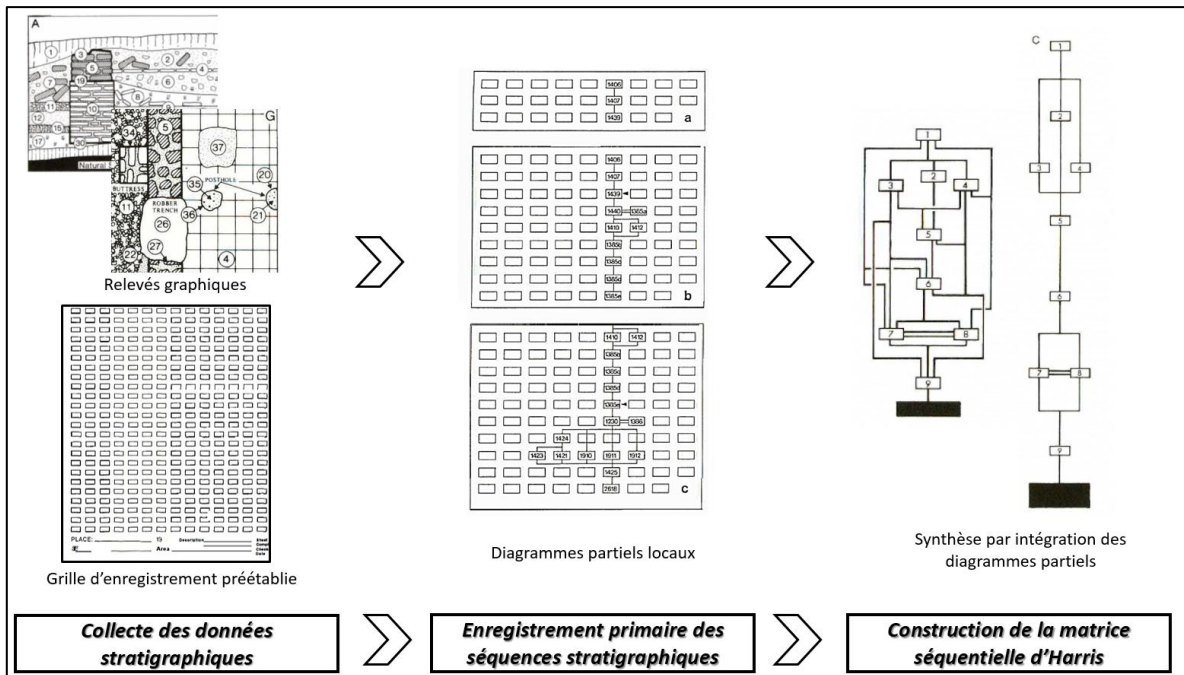


Figure 26: Etapes de la construction du diagramme séquentiel « Harris matrix ».

Source : E. C. Harris 1989. Traitement : auteure

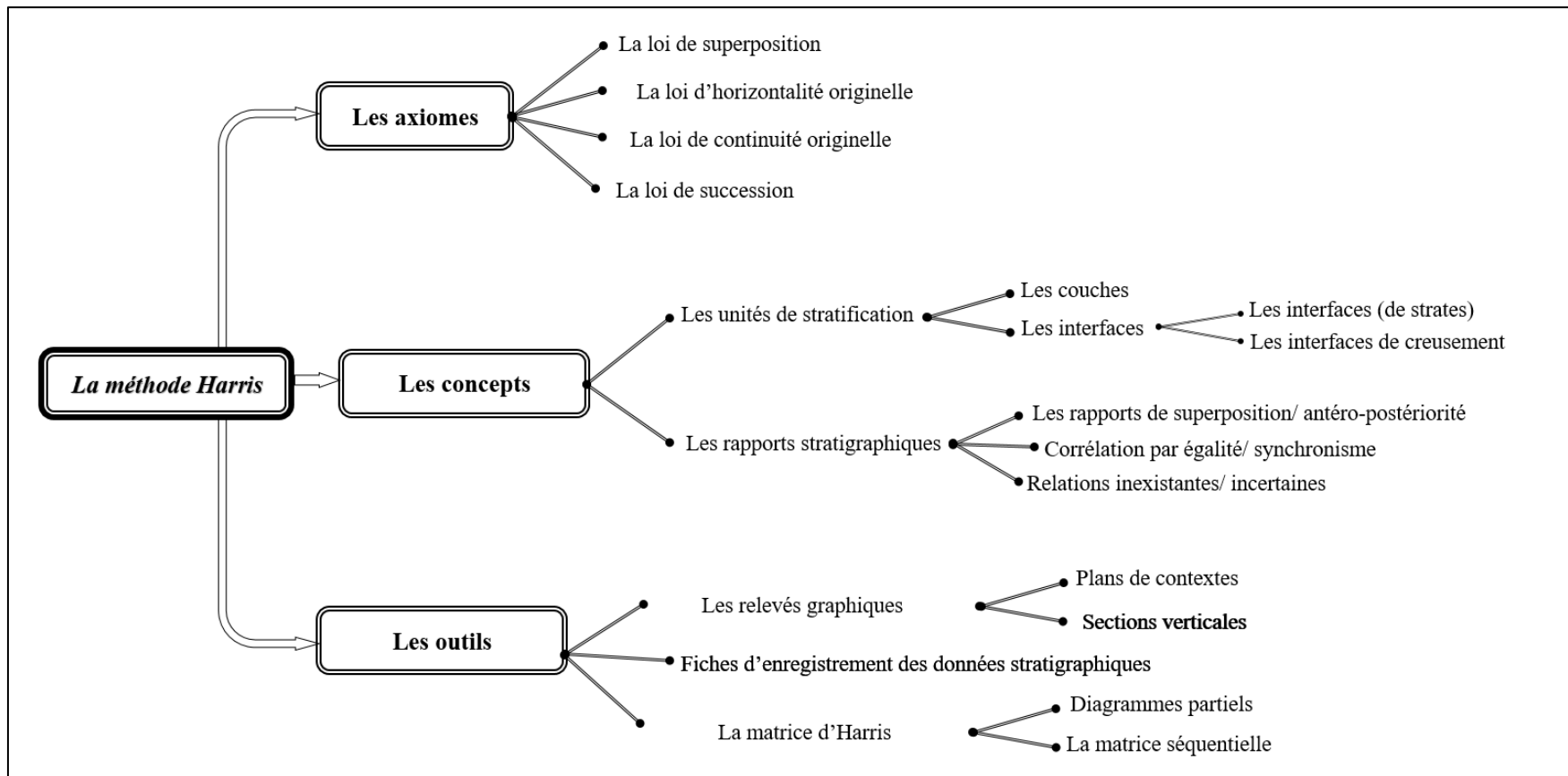


Figure 27: Schéma synthétique de la méthode stratigraphique archéologique de Harris.

Source : auteure

La méthode Harris pour l'étude de la stratification architecturale :

La stratigraphie : de l'archéologie vers l'étude de l'architecture historique

Les prémices de la conception d'une stratigraphie du bâti en tant que pratique autonome, distincte de l'archéologie classique, remontent à la première moitié des années 1970, en lien étroit avec le développement de l'archéologie urbaine et de l'archéologie médiévale moderne (Genovez 2012), en Angleterre puis en Italie. L'importance des artefacts bâtis, et leur rôle, de plus en plus central dans la compréhension de l'histoire des peuplements et le décryptage de la culture matériel des occupants, a ouvert le champ à l'implication progressive et croissante d'architectes dans l'étude des sites archéologiques. Le bâti n'apparaît plus seulement comme un témoignage matériel des ressources textuelles ou de la réalité anthropologique d'un passé révolu, mais comme une source documentaire à part entière, capable de pallier les lacunes —voire l'absence— de données et informations archéologiques.

Ce constat initial a nourri des réflexions plus poussées sur les pratiques encadrant l'étude, la restauration et la conservation des monuments historiques. En effet, l'accent a été mis sur l'insuffisance des données strictement géométriques ou métriques, longtemps considérées comme principales ressources nécessaires à l'analyse architecturale (Davies 1987). La prise de conscience envers la nécessité de l'intégration et l'enregistrement de données de natures diverses —telles que les données culturelles, sociales, historiques ou contextuelles— pour une compréhension optimale du bâti historique, s'est rapidement dessinée dans la vision des spécialistes du bâtiment.

Dans ce contexte, la stratigraphie architecturale a révélé un double rôle essentiel dans le champ de la restauration. D'un côté, elle constitue une méthode d'analyse préalable à l'intervention, permettant de saisir les logiques morphologiques, constructives et structurelles des édifices, conçus comme des œuvres complexes issues d'interactions stylistiques, fonctionnelles et techniques. De l'autre, elle se présente comme un outil d'enregistrement, apte à documenter les éléments architectoniques et constructifs susceptibles d'être modifiés, recouverts ou irrémédiablement perdus à la suite d'une intervention.

C'est dans cet élan que s'est affirmée une approche multidisciplinaire, celle de l'archéologie du bâti —ou plus précisément *l'archeologia dell'architettura*— à la croisée de l'architecture, de l'archéologie, de l'histoire de l'art et de la restauration. Cette évolution a favorisé un dialogue entre spécialistes des artefacts architecturaux, et des archéologues. Dès les années 1980, de nombreux colloques, publications et événements scientifiques et professionnels ont vu le jour

en Italie. L'un des plus marquants fut le premier cycle de cours sur la recherche appliquée en archéologie, organisé à l'Université de Sienne en 1987, consacré à l'archéologie et à la restauration des monuments historiques. Ce fut un moment fondateur, considéré comme le premier grand forum d'échange et de partage d'expériences entre chercheurs et praticiens engagés dans l'étude stratigraphique des édifices (Brogiolo 2007). Parmi les figures majeures ayant contribué à cet événement R. Parenti et R. Francovich. Les actes de ce cycle ont été publiés en 1988, constituant une référence majeure dans le domaine (Del Giglio, Parenti, et Francovich 1988).

D'autres contributions ont suivi et ont largement nourri la discipline, notamment les ouvrages de G. Brogiolo (Brogiolo 1988) et S. Doglioni (Doglioni 1997), aujourd'hui encore considérés comme fondamentaux de la stratigraphie architecturale, ainsi que la revue *Archeologia dell'Architettura*, parue en 1996, consacrée à l'archéologie du bâti, à la stratigraphie constructive et aux techniques de datation du patrimoine architectural.

Cependant, malgré l'enrichissement conceptuel et méthodologique apporté par ces contributions, le débat a longtemps été controversé entre architectes et archéologues. Ces derniers soutiennent que l'histoire des constructions ne saurait être dissociée d'un cadre chronologique plus vaste, étroitement lié à celle des établissements humains. Pourtant, l'expérience accumulée au fil des projets et des chantiers, tant architecturaux qu'archéologiques, a révélé d'importantes divergences entre la stratigraphie archéologique classique et ses modalités d'application dans le domaine de l'architecture historique (Brogiolo 2007).

En effet, si l'objet d'étude principal — les artefacts — est commun aux deux disciplines, la stratigraphie archéologique se situe à la croisée de la stratigraphie géologique, qui s'intéresse principalement aux composantes naturelles du sol, et de la stratigraphie architecturale, qui traite exclusivement des éléments anthropiques et culturels. Ces deux approches reposent ainsi sur des fondements théoriques et physiques distincts, impliquant des méthodes d'analyse et d'interprétation différentes.

Adaptation de la méthode stratigraphique de Harris au patrimoine bâti :

L'introduction de la lecture stratigraphique dans l'étude des œuvres du patrimoine bâti, ne s'est pas opérée sans mise en lumière critique d'incohérences dans les principes et les modalités d'application de la méthode proposée par Harris (Brogiolo 1988), bien que celle-ci fut largement

influyente en archéologie du bâti. Ainsi, la stratigraphie architecturale — également appelée stratigraphie constructive, stratigraphie des élévations, ou stratigraphie du bâti — a dû s'adapter aux spécificités propres aux œuvres du bâti historique pour s'affirmer comme une méthode à part entière.

- Objet d'étude et principes fondamentaux :

Un premier écart a été soulevé par les architectes et les professionnels du bâtiment, concernant la nature même de l'objet d'étude de chacune des disciplines. Alors que la stratigraphie archéologique repose sur une approche essentiellement destructive, visant le dégagement et l'identification de l'ordre d'occurrence des masses enfouies en profondeur, la stratification architecturale, quant à elle, est une lecture spatiale en élévation (Genovez 2012) (Haouacha, Ravaglia, et Boufenara 2025). Elle porte principalement sur des objets architecturaux ayant évolué dans des conditions d'usage et de transformation radicalement différentes de celles des couches archéologiques. Les échofacts (Desachy 2008a), ainsi que les données de sédimentation naturelle, éléments centraux dans l'analyse archéologique, ne sont donc pas considérés comme des agents pertinents dans la lecture stratigraphique du bâti, inversement au spécimen archéologique.

Le caractère non destructif de la stratigraphie du bâti confère à l'approche architecturale la possibilité de reproductibilité, de ré-exploitation des données et de mises à jour ultérieures. À l'inverse, la stratigraphie archéologique repose sur un processus irréversible, rendant impossible toute actualisation ou reprise de l'analyse une fois l'excavation achevée.

Cette distinction permet de mieux cerner les champs d'application et les finalités respectives des deux démarches stratigraphiques. Tandis que l'approche archéologique vise la reconstitution des séquences de formation/ disparition des cycles d'occupations humaines et leurs différentes manifestations ; la stratigraphie architecturale cherche à identifier les diverses actions et transformations constructives qu'un édifice aie subie au fil du temps, et les interventions qui ont façonné sa morphologie, modelé son inertie, et contribué à son identité matérielle et formelle.

Dans la même lignée, Boato et Doglioni avaient souligné la divergence du processus de déposition, à l'origine de la genèse du phénomène de stratification (Doglioni 1997). Si le mode de formation des sites archéologique est unidirectionnel, orienté de bas en haut à l'instar des couches géologiques, la stratification architecturale, elle, se développe de manière plus

complexe et diffuse, selon une dynamique tridimensionnelle dans l'espace bâti. Cette dernière spécificité remet en question la pertinence des quatre principes fondamentaux sur lesquels repose la théorie de Harris — à savoir la superposition, l'horizontalité et la continuité originelles, et la loi de succession. En effet, bien que l'édification initiale d'un bâtiment, suive une logique ascendante, les opérations de réparation, d'entretien, de réaménagement ou de transformation échappent à cette progression verticale, remettant en question ainsi, les règles classiques de la stratigraphie archéologiques (Figure. 28).

Cet intérêt exclusif pour la matérialité des bâtiments ainsi que pour les données architecturales et constructives, a conduit à une reconsidération des outils et des modalités d'application habituellement employés en archéologie.

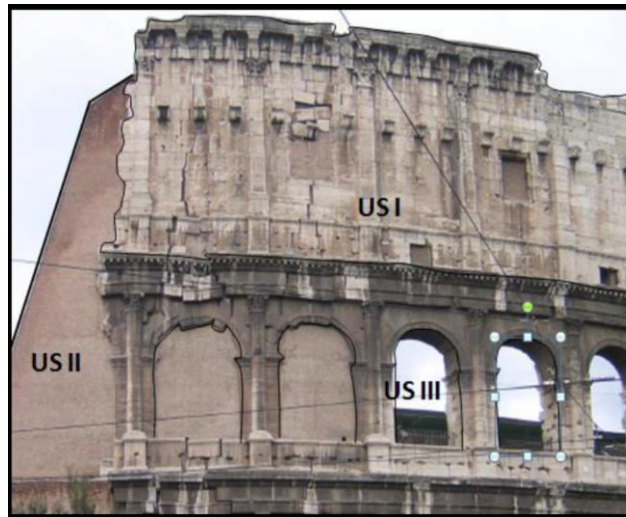


Figure 28: Stratification multidirectionnel : différentes interventions sur le colisée.

Source : L. Fiorini. Traitement : auteure

- Système conceptuel de la stratigraphie architecturale :

Étant une technique d'analyse non destructive (NDT), la stratigraphie architecturale ne permet l'observation des unités stratigraphiques — considérées comme modules analytiques élémentaires — que sur les surfaces apparentes. Cette contrainte a entraîné un retour à la tradition de la lecture verticale en surface. En effet, bien que la stratification du bâti se développe dans la tridimensionnalité de l'espace, ceux sont principalement les façades extérieures et les élévations intérieures qui concentrent l'essentiel des informations stratigraphiques exploitables en architecture.

En stratification du bâti historique, la reconnaissance des unités stratigraphiques (US), ne se limite pas aux seules données issues du terrain, comme c'est le cas en archéologie. Elle se fait conjointement par inspection visuelle des différentes surfaces du bâti, et par la mobilisation d'un ensemble d'informations analytiques et descriptives de diverses natures — historiques, structurelles, contextuelles, ainsi que les caractéristiques et les modalités de mise en œuvre des matériaux(Davies 1987).

Dans ce contexte, les concepts fondamentaux de la stratigraphie définis par Harris sont revus et réadaptés aux spécificités de l'architecture par l'introduction de précisions ad hoc aux œuvres bâti. Ainsi, les couches archéologiques sont traduites en '*unités stratigraphiques positives*', tandis que les interfaces de creusement sont déterminées par '*unités stratigraphiques négatives*'. Le concept d'interface est conservé et désigne la surface abstraite de séparation entre deux unités stratigraphiques adjacentes.

Les US positives en stratigraphie architecturale sont définies comme étant le résultat d'actions de construction ou d'édification. Avec l'évolution des pratiques stratigraphiques au service de la conservation du patrimoine bâti, plusieurs types d'US ont été développées pour mieux répondre aux objectifs spécifiques des interventions telles que les US de transformation et les US dissimulées(Genovez 2012). Dans des travaux récents, Villalobos a proposé une classification des US positives, afin de faciliter la gestion des différents niveaux d'intervention lors des opérations de conservation. Il a défini ainsi trois catégories distinctes pour organiser son flux de travail : US structurelles, US décoratives, et US pathologiques(Villalobos 2024).

Les US négatives, quant à elles, sont associées aux interruptions brusques et inattendues exprimant une discontinuité non planifiée initialement. Cela peut être l'œuvre d'actes destructifs volontaires (retrait, création d'ouvertures) ou le résultat d'altérations accidentelles. Dans ce cadre, est apparue la notion d'US virtuelle, désignant des vides dans la masse bâtie, lisibles comme l'emplacement d'un élément disparu(Genovez 2012). Dans des travaux destinés à la reconstruction virtuelle des artefacts, Demetrescu a introduit avec précision cette notion d'US virtuelle, au sein d'une matrice étendue destinées à représenter la logique de réflexion menée dans le cadre de la reconstitution des états passés du bâti(Demetrescu 2015).

Une fois définies, les unités stratigraphiques (US) sont mises en relation afin de faire ressortir leur ordre d'occurrence ainsi que leur place dans la morphologie finale du bâtiment. Les rapports stratigraphiques en architecture traduisent la nature des actes et des opérations

constructives qui leur sont sous-jacents. Dans ce cadre, Parenti identifie trois types de connexions (Genovez 2012):

- a. Les rapports de postériorité : établis entre des unités en contact, où une unité est considérée comme postérieure à son homologue lorsqu'elle « repose sur », « recouvre » ou « remplit » celle-ci ;
- b. Les rapports d'antériorité : qui qualifient une unité comme préexistant à une autre lorsqu'elle est « recouverte par », « consolidée par », « comblée par » ou « coupée par » cette dernière ;
- c. Les rapports de contemporanéité : qui se manifestent soit par égalité entre deux unités initialement issues d'une même entité mais désormais séparées —unité égale à une autre— soit par la synchronie entre deux unités distinctes mais analogues, identifiée à travers des caractères concordants —unité liée par, ou unité analogue à une unité paire.

Malgré un consensus méthodologique autour des trois types de rapports stratigraphiques, la limitation d'une chronologie fondée uniquement sur des relations relatives entre unités stratigraphiques, fait l'objet de vives critiques parmi les chercheurs et les praticiens. M. Davies a clairement souligné la nécessité d'intégrer des temporalités quantifiées afin de mieux appréhender l'évolution des structures (Davies 1987). Il fut le premier à proposer l'inscription des US dans des intervalles temporels plausibles, déterminés par des seuils plancher/ plafond, en recourant aux notions de « *terminus post quem* » et « *terminus ante quem* », déterminés à partir de l'analyse des styles architecturaux, des techniques de construction ou des matériaux employés. Renforçant cette position, T. Mannoni, A. Cagnana et A. Boato ont largement approfondi la question des limites de la chronologie relative entre les différentes US. Ils ont proposé des analyses de datation complémentaires à la stratigraphie Harrisienne, telles que la mensiochronologie, la dendrochronologie ou encore la typochronologie¹³.

13

- La mensiochronologie constitue une technique de datation relative basée sur l'étude métrique des matériaux de construction.
- La dendrochronologie est une méthode de datation absolue des structures en bois, reposant sur l'analyse des cernes de croissance des arbres, et largement utilisée en archéologie et en architecture pour déterminer l'âge des éléments ligneux.
- La typochronologie constitue une méthode de datation relative reposant sur l'analyse et la classification des formes, des styles et des techniques constructives, dans le but d'identifier les différentes étapes de l'évolution historique.

Une fois définis, les différents éléments de lecture stratigraphique du bâti font l'objet d'un recueil et d'un enregistrement rigoureux, en vue d'une exploitation à la fois fiable et pertinente, ouvrant la voie à des inférences solides et à des interprétations scientifiquement fondées.

- Outils de la stratigraphie architecturale :

Comme cela a pu être indiqué précédemment, l'identification des unités stratigraphiques est le fruit d'une enquête visuelle minutieuse des œuvres étudiées faite sur la base de normes préétablies (ICOMOS 1990). Celle-ci se fait parallèlement à une classification basée sur des informations de recherche non géométriques, ayant pour objet le contenu des US. Cette approche diffère fondamentalement de la pratique archéologique, où l'identification des unités de stratification tend à écarter toute exploration analytique du contenu caractéristique de la couche.

Dans ce contexte, chaque type d'information recueilli doit être transcrit et enregistré de manière précise et appropriée, de façon à constituer une base solide pour la compréhension et la reconstitution de la genèse morphologique des œuvres. Compte tenu de la nature des objets d'étude, ainsi que des objectifs de l'exploration du patrimoine bâti, le relevé architectural constitue l'outil de référence pour la représentation et l'enregistrement des données métriques et géométriques. C'est sur ce support que les informations stratigraphiques sont reportées. Chaque unité stratigraphique identifiée est alors délimitée, codifiée et dotée d'un identifiant unique, comme l'illustre la (Figure 29).

Les unités stratigraphiques négatives doivent être clairement distinguées des interfaces à l'aide de conventions graphiques telles que le type, l'épaisseur ou la couleur du trait. Des symboles peuvent également être associés aux identifiants afin d'indiquer la nature des unités : dans notre exemple ci-dessous, les US positives sont inscrites dans des carrés, tandis que les US négatives le sont dans des cercles.

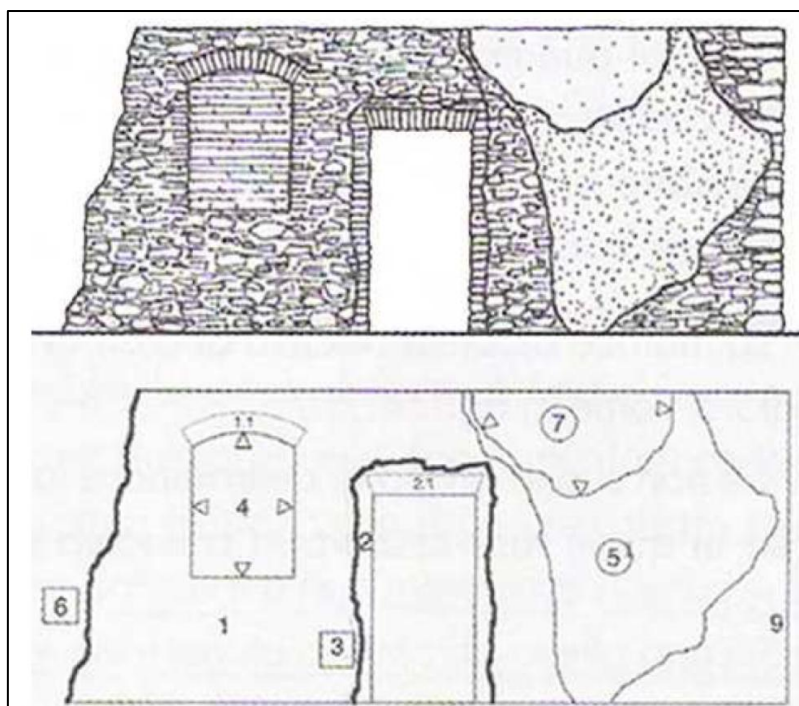


Figure 29: Transcription des unités stratigraphiques sur relevé architectural.

Source : Sarita Carneiro Genovez 2012

F. Doglioni pousse encore le rôle du relevé architectural, en définissant son concept de relevé critique (Doglioni 1997), qui, en plus des données métriques et géométriques précises, contient des annotations sur les signes de transformations.

En ce qui concerne les données sémantiques caractérisant les unités stratigraphiques recensées, les fiches d'enregistrement contextuelles, proposées par Harris, sont reprises dans la même logique, permettant d'y consigner toute information analytique ou descriptive collectée. Divers modèles de fiches peuvent être élaborés selon le type d'artéfact étudié et les objectifs spécifiques de l'analyse.

Pour la représentation de la séquence chronologique, la matrice de Harris est utilisée afin de schématiser l'évolution et la genèse du bâti dans le temps. La symbolisation des différents types d'US par des formes distinctes permet de différencier les US positives des US négatives (Traxler et Neubauer 2009). Cette codification graphique n'est pas standardisée, mais relève d'une organisation personnalisée du travail, définie par les responsables d'étude, et explicitée dans des légendes.

Les rapports d'antériorité et de postériorité sont représentés par une organisation verticale des unités stratigraphiques, reliées par des arêtes pointant vers le haut, disposant les US des plus anciennes aux plus récentes. Les rapports de contemporanéité, quant à eux, sont matérialisés par un alignement horizontal des unités : une arête simple indique un rapport d'analogie, tandis qu'une arête double signale un rapport d'égalité(Desachy 2008a). La (figure. 30) démontre la représentation des unités et des rapports de stratification architecturale dans la matrice Harris

Pour répondre à la problématique des chronologies quantifiées soulevée par les spécialistes du bâti historique, l'intégration de codes couleurs, de cadres graphiques ou d'axes temporels(May 2020) dans la matrice, permet d'indiquer des phases, des périodes ou des époques distinctes(Neubauer et al. 2018).

Malgré ces apports, certaines limites réduisent sensiblement l'utilité et la fiabilité de la matrice stratigraphique de Harris pour appréhender la séquence chronologique de la genèse constructive. Son caractère fortement schématique et rigide ne permet pas une lecture qualitative ou sémantique des données spatiales et morphologiques : les nœuds du diagramme ne rendent pas compte de la forme, des dimensions ou des topologies respectives des US. Enfin, la lisibilité du diagramme diminue fortement à mesure que sa densité augmente, ce qui limite sa pertinence pour la documentation des structures fortement stratifiées(LAYT et Recording Archaeology 2016). Ces limites ne sont pas exhaustives, mais elles reflètent les principales difficultés rencontrées sur les chantiers d'étude.

À ces observations critiques et scientifiquement fondées sur la méthode Harris, s'ajoute la question pertinente des reconstructions à l'identique, notamment à travers la pratique de l'anastylose — qui consiste à reconstituer des œuvres en réemployant leurs matériaux authentiques. Ces interventions, fréquentes dans le traitement des œuvres patrimoniales diachroniques, peuvent prêter à confusion et soulèvent un enjeu méthodologique majeur : celui de l'appartenance d'une même unité homogène à deux phases distinctes du diagramme de Harris. Par ailleurs, les tentatives d'introduire des éléments de chronologie absolue demeurent insuffisantes pour exprimer les rapports de permanence, de coexistence ou de chevauchement temporel entre unités(Haouacha, Ravaglia, et Boufenara 2025).

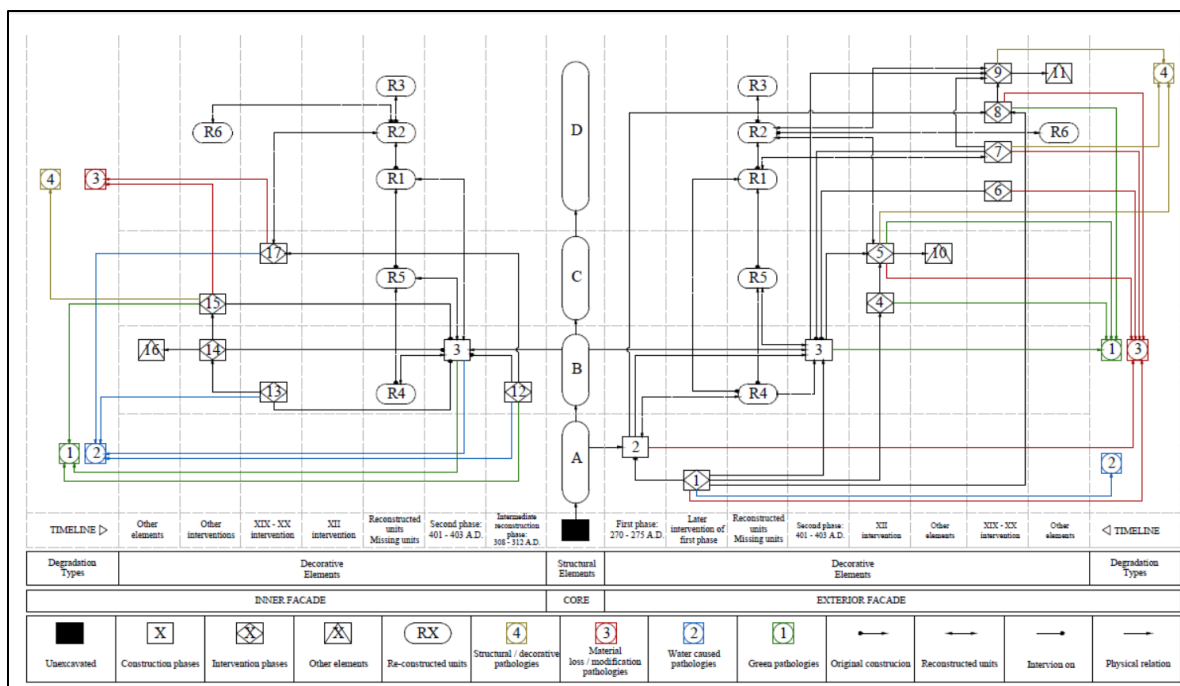


Figure 30: exemple d'une matrice d'Harris pour l'étude de la stratigraphie architecturale.

Source: Roberto Villalobos. 2024

2.2. La stratigraphie assistée numériquement :

Avec l'essor de l'industrie 4.0, les technologies d'information et de communication (TIC), et l'introduction progressive de la numérisation des données dans les domaines de l'archéologie et de l'architecture en général, et du patrimoine bâti en particulier, de nouvelles approches méthodologiques ont profondément transformé les pratiques de documentation et de conservation. Ces technologies émergentes ont permis une gestion plus efficace des tâches, une innovation dans le traitement et la représentation des informations, ainsi qu'une production de connaissances auparavant difficilement accessible par les méthodes traditionnelles. Le champ de la stratigraphie du bâti a également, connu une évolution significative grâce à l'intégration de ces outils informatiques, que ce soit pour la collecte, le traitement, l'interprétation ou la diffusion des données.

2.2.1. Informatisation du traitement et de la compilation du diagramme stratigraphique :

À l'aube des années 2000, avec l'adoption massive des outils informatiques dans la réalisation des tâches scientifiques, notamment celles impliquant des calculs lourds et fastidieux, l'automatisation de la compilation de la matrice stratigraphique est devenue un enjeu central. En effet, les limites des méthodes classiques, fondées sur une représentation, une organisation et une gestion manuelle de l'ensemble des unités stratigraphiques (US) et de leurs relations, ont

conduit à une réflexion approfondie sur le développement d'outils numériques visant la formalisation et la gestion des données stratigraphiques recueillis sur site.

Plusieurs travaux ont été initiés dans ce sens, donnant lieu à la création d'outils spécialisés, tels que des éditeurs de graphes, facilitant l'enregistrement des données stratigraphiques et l'édition automatique des matrices de Harris.

L'application ArchEd, développée dès 1998 (Hundack et al. 1998), est conçue comme un éditeur de diagrammes permettant de générer automatiquement la matrice de Harris sous forme d'un graphe synthétique. Ce programme organise les US en niveaux selon leurs positions topologiques, tout en supprimant les duplications susceptibles d'apparaître au cours de l'enregistrement primaire des données. L'outil a contribué également, à réduire les arêtes relationnelles au strict nécessaire, en éliminant les redondances et les incohérences logiques dans les rapports stratigraphiques. Dans le même ordre d'idées, l'outil Stratify a été conçu en 2004 (Herzog 2004) pour répondre plus spécifiquement à la question de la représentation de l'abondance d'informations stratigraphiques, et à la gestion des séquences multilinéaires et les données flottantes dans les diagrammes synthétiques. En plus de permettre la construction et la structuration des matrices stratigraphiques, l'outil Stratify proposait une représentation chronologique dite de haut niveau, rassemblant les US en groupes organisés hiérarchiquement. Ces *clusters* pouvaient être contractés ou développés selon les besoins de l'analyse. Le programme offrait ainsi, la visualisation des séquences stratigraphiques à plusieurs niveaux de granularité : en « mode boîte noire » n'affichant que les groupes (en masquant leurs US et relations internes) ; en « mode boîte grise » rendant visibles les US contenues dans chaque groupe sans afficher leurs relations, et en « mode boîte blanche », révélant l'ensemble des US ainsi que leurs relations au sein d'un diagramme composé.

Bien que ces outils aient grandement facilité la génération et la structuration des matrices stratigraphiques, ils ne prenaient pas en charge la gestion des types d'US ni de leurs propriétés sémantiques ou attributs spécifiques. C'est dans cette optique qu'a été conçu le logiciel « Harris Matrix Composer » développé en s'appuyant sur la théorie de Harris et pensé pour les besoins des fouilleurs travaillant sur site (Traxler et Neubauer 2009). En effet l'éditeur comporte une section pour la documentation des US recensées —jouant ainsi le rôle des fiches d'enregistrement des contextes individuels— et de leurs rapports respectifs. Il offre une représentation différenciée des US positives, et des US interfaciales par formes et couleurs. Il permet aussi, une distinction entre les rapports stratigraphiques topologiques —représenté en

flèches continus— et les relations temporelles —en traits interrompus. Le programme gère la compilation, en présentant des unités structurantes par défaut au lancement de l'interface : la « *top-surface* » représentant le sommet de la matrice, et marquant le début des travaux d'excavation, et l'« *interface to geology* » marquant la limite inférieure de la matrice. Entre les deux, un nœud intermédiaire nommé « *unexcavated* » qui ne peut être supprimé qu'une fois les travaux de fouilles achevés. Vu que l'implémentation s'est faite sur la base des principes stratigraphiques d'Harris, l'outil permet la validation des entrées, la détection des erreurs logiques, ou des incohérences.

Dans son application « le stratifiant »(Desachy 2008b), B. Desachy prolonge ces avancées en y ajoutant la gestion des relations incertaines —comme « *peut-être antérieur à* »— ainsi que l'intégration de repères chronologiques absolus, via l'insertion de bornes TPQ (terminus post quem) et TAQ (terminus ante quem), permettant d'inscrire les données stratigraphiques dans une temporalité historico-archéologique plus précise.

Dans leur travail de recherche mené en 2005, Stanwniak et al, présentaient une première tentative d'intégration des données spatiales en 3D à la matrice d'Harris purement schématique(Stawniak, Walczak, et Bobowski 2005). Dans leur approche, les auteurs proposaient la une modélisation basée sur les données de la matrice Harris en 3D, dans un système de référence local. En effet, lors de l'insertion des informations des US recueillies dans la base de données interne, chaque unité est décrite par un ensemble structuré : coordonnées du centre de gravité des couches, nature du contenu, informations temporelles, relations stratigraphiques relatives ...etc. Les nœuds des diagrammes sont alors représentés par des cylindres dont le barycentre correspond aux coordonnées des US enregistrés préalablement. Deux modèles de visualisation peuvent être générés, un modèle où l'axe des Z représente la profondeur topographique des US, et un autre type où l'axe verticale représente la position séquentielle des US.

La (figure. 31) illustre les matrices d'Harris générées par les différents programmes susmentionnés.

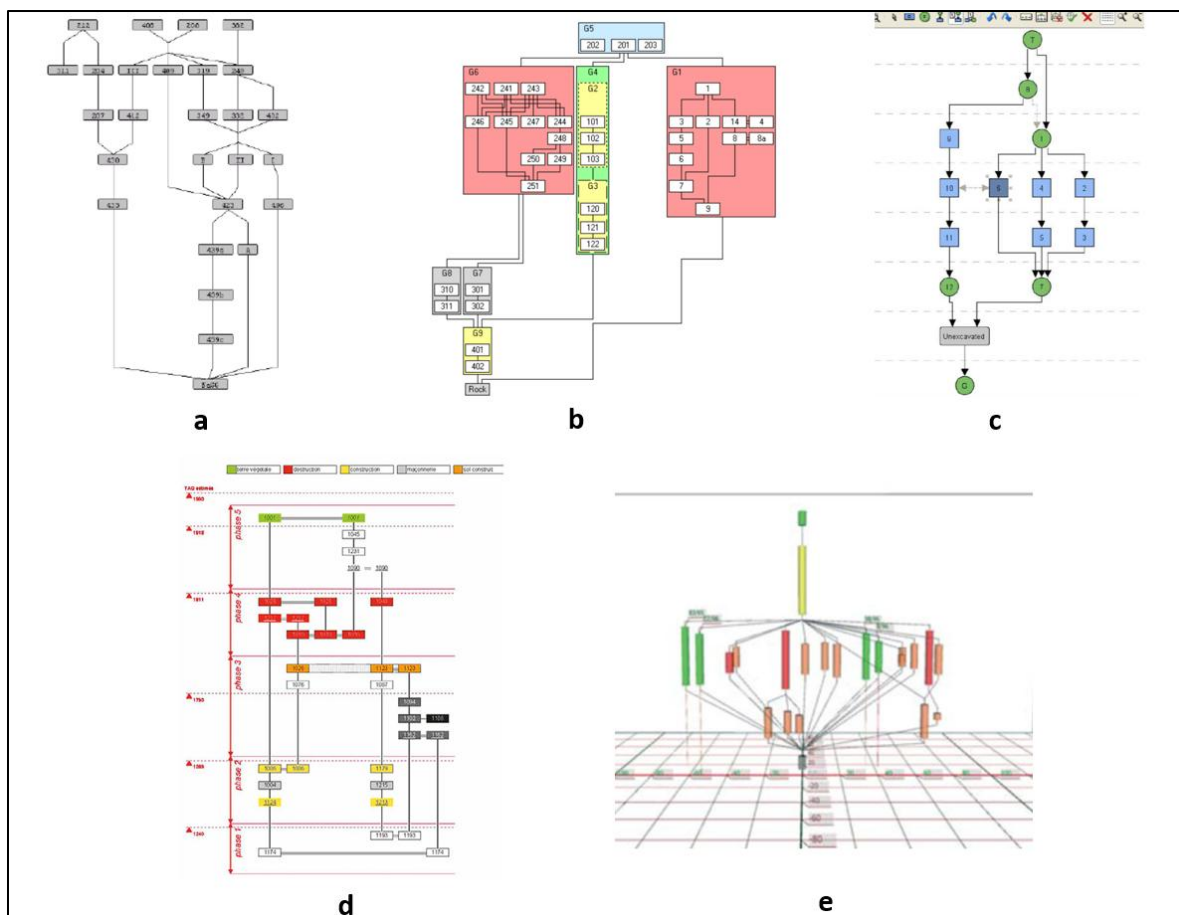


Figure 31: les matrices d'Harris générées par différents outils de gestion des données stratigraphiques.

a : ArchEd (source : Hundack et al, 1998); b : Stratify (source : Herzog, 2004); c: Harris Matrix Composer (source : Traxler et Neubauer, 2009) ; d: Stratifiant (source : Desachy, 2008), e: 3D Harris matrix visualisation (source : Stanwniak et al, 2005).

2.2.2. Modélisation numérique de l'information stratigraphique dans sa multi-dimensionnalité (spatio-morphologique et temporelle)

L'introduction des systèmes d'information géographique (SIG) dans les domaines de l'archéologie et de l'urbanisme, au cours des dernières décennies, a marqué un tournant méthodologique majeur par rapport aux approches traditionnelles. En stratigraphie, l'utilisation des plateformes SIG a permis la création de modèles géoréférencés intégrant à la fois les données spatiales du terrain —données géométriques— et les attributs descriptifs qui leur sont associés —données sémantiques. Cette avancée a rendu possible l'interconnexion entre la documentation des unités stratigraphiques, auparavant consignée séparément dans des fiches d'enregistrement, et les relevés graphiques —2D et 3D— réalisés in situ, grâce à l'emploi d'une base de données spatiales. Par ailleurs, cette approche a permis un travail analytique plus rigoureux, en offrant la possibilité d'un stockage pérenne des données, une visualisation globale

grâce à un système multicouche — fondé sur la superposition de calques thématiques — ainsi qu’une capacité accrue de recoupement et de croisement des différentes informations collectées, au moyen de requêtes lancées et de filtrage du contenu. Dans leurs travaux d’enregistrement de l’excavation du site de Paliambela Kolindros, en Grèce, Katsianis et al. (Katsianis, Kotsakis, et Stefanou 2021) ont eu recours aux outils SIG pour la reconstruction et l’archivage numérique du site, ainsi que pour l’agrégation des différentes informations collectées lors du travail de terrain. Les auteurs se sont appuyés principalement, sur des modèles de représentation vectorielle et matricielle pour la modélisation 3D des différentes entités stratigraphiques. Quant aux données thématiques recueillies —matériaux, contenus des strates, données de datation, etc— elles ont été structurées au sein d’un modèle de données relié à la maquette numérique 3D (Katsianis et al. 2008). Cette approche a permis un enregistrement holistique des différentes informations, ainsi qu’une exploitation optimale, sans perte de données ni omission. Malgré ces avancées, les outils SIG sont encore considérés comme insuffisants pour représenter de manière fiable et détaillée la complexité des données spatiales et la diversité de leurs interrelations, en particulier à l’échelle architecturale. En effet, les capacités tridimensionnelles des SIG permettent principalement la génération de modèles en 2.5D, plutôt que de véritables modèles « as-found » précis, pourtant indispensables à une description rigoureuse et à une exploration approfondie du patrimoine bâti.

En partant de ces limites, plusieurs travaux ont été destinés à l’implémentation de systèmes d’information adaptés pour l’étude et l’enregistrement de la stratigraphie archéologique et architecturale des sites tel que le logiciel d’enregistrement de l’excavation proposé par Ortega-Alvarado (Ortega-Alvarado et al. 2022), ou encore les plugin de la plateforme ‘Ad-Hoc’ développée par (Ardissone et al. 2013). Dans ce dernier travail, les auteurs ont mis en place un système de gestion d’une base de données spatiale, où sont stockés et enregistrés les données recueillies lors du travail d’excavation. L’application développée —structurée en deux modules complémentaires au sein de la plateforme ‘Ad-Hoc’— vise à connecter les différents types de données recueillies lors de l’étude stratigraphique au modèle 3D du site. Ce dernier, obtenu par télédétection, constitue une maquette numérique fidèle à l’état existant. Les unités stratigraphiques identifiées sont ensuite, dessinées sur divers documents graphiques (orthophotographies, relevés, croquis, etc.) puis géoréférencées sur le modèle 3D à l’aide de leurs coordonnées spatiales. Chaque unité est ensuite, rigoureusement documentée par la saisie d’informations dans les fiches d’enregistrement contextuelles stockées directement dans la base de données, en précisant les attributs ainsi que les relations avec les unités adjacentes.

L'application permet en outre, la génération automatique de la matrice séquentielle de Harris, au fur et à mesure de l'intégration des informations. Vu que toutes les informations sont liées à travers la base de données relationnelle, la mise à jour d'une entrée, permet l'actualisation instantanée de toutes les données. Le système offre également, la possibilité de créer un diagramme stratigraphique tridimensionnel, représentant les nœuds directement sur les éléments correspondant du modèle 3D.

À l'échelle architecturale, les récentes évolutions des technologies BIM —Modélisation des Informations du Bâtiment— ont profondément influencé l'étude des œuvres du patrimoine bâti, notamment à travers le développement des procédures HBIM —BIM pour le patrimoine. En effet, compte tenu de l'approche multidisciplinaire propre à l'analyse des artefacts historiques, les méthodologies BIM offrent une solution privilégiée pour l'intégration de données de diverses natures autour d'un modèle 3D paramétrique. Plusieurs études récentes ont été consacrées à l'étude de la stratification architecturale de bâtiments historiques à travers les techniques HBIM. Citons de façon non exhaustive les travaux de Brusaporci et al. pour l'analyse stratigraphique de l'église de Saint-Victorin près de L'Aquila en Italie (Brusaporci et al. 2018) ; l'étude de Nieto Julián et Moyano campos menée sur le siège de l'Université de Séville en Espagne (Nieto Julián et Moyano campos 2014); ou encore le travail de Mammoli et al. sur le palazzo Ferretti à Ancône en Italie (Mammoli, Mariotti, et Quattrini 2021). Le recours aux modèles HBIM pour l'étude stratigraphique, a été motivé principalement, par la possibilité de l'organisation et la spatialisation des données temporelles et chronologiques, autours des données spatio-morphologiques des œuvres. Cependant, certaines problématiques ont été soulevées quant à la fiabilité des maquettes paramétriques, et aussi de à l'organisation sémantique des modèles. En effet, étant donné la complexité morphologique et géométrique des artefacts patrimoniaux caractérisés par des éléments non standards, façonnés par la patine du temps, et les dégradations d'origines naturelles ou anthropiques, les modèles paramétriques à bases de formes géométriques primitives, s'avèrent inappropriés pour reproduire la singularité des œuvres historiques. De plus, les familles d'éléments BIM et leur structuration interne, sont souvent trop simplifiées pour décrire la diversité des configurations d'éléments préindustriels, souvent inachevés, irréguliers ou fortement dégradés du patrimoine bâti.

Compte tenu de cela, des procédures basées sur la réalité, ont été mises en place —scan-to-BIM. Elles consistent à modéliser la maquette paramétrique par calque direct sur le nuage de points fidèle à la réalité (Diara et Rinaudo 2020) en améliorant les niveaux de développement (LOD) et les degrés de génération (GOG) (Banfi 2017). Pour ce qui est de l'enrichissement

sémantique, les informations décrivant la volumétrie, sont organisées dans des tableaux ou des bases de données relationnelles connexes (Brusaporci et al. 2018). L'un des flux de travail les plus complets dans ce sens est le travail effectué par Santoni et al (Santoni et al. 2021). En effet, les auteurs ont proposé une approche à trois niveaux pour l'intégration des informations constructives et historiques d'ouvrages stratifiés dans un même modèle HBIM. La méthode utilisée comprend : 1) une modélisation géométrique détaillée ; 2) une modélisation sémantique des données stratigraphiques recueillies, et ; 3) une extraction d'information et une génération de connaissances à partir du modèle HBIM créé.

La modélisation géométrique a été réalisée sur la base d'un nuage de points dense —créée conjointement par photogrammétrie, scanner laser terrestre, et station totale— servant de système de références pour la création d'éléments architecturaux. Cette étape a mobilisé des familles d'objets prédéfinies ainsi que la production d'éléments sur mesure à base de NURBS¹⁴, permettant ainsi, d'obtenir une volumétrie fiable tant sur le plan métrique que géométrique.

Pour l'étape d'enrichissement sémantique du modèle, une taxonomie a été élaborée, regroupant trois types d'ensembles de données —éléments architecturaux, entités stratigraphiques, et rapports stratigraphiques. La segmentation préétablie sur sections —reconnaitances et délimitation des unités stratigraphiques sur terrain— est importée dans l'environnement BIM pour permettre de tracer les différentes divisions. Enfin les concepts générés dans la taxonomie sont affectés à la volumétrie comme attributs, et les différents supports de documentations — plans, élévations, matrice de Harris— sont connectés en tant que liens externes.

Une fois le modèle HBIM créé —volumétrie enrichie sémantiquement— les auteurs ont fait appel aux avantages du langage de programmation visuelle pour concevoir une interface, permettant de faire dialoguer les différentes données introduites dans le système, afin d'extraire des informations, et générer de nouvelles connaissances via le filtrage des données par requêtes.

Malgré ces avancées dans l'amélioration des aspects géométriques et sémantiques des modèles HBIM, leur efficacité demeure limitée en matière de stratigraphie et, plus largement, pour l'étude du patrimoine bâti. Cette limite s'explique par la complexité de l'approche et sa forte

¹⁴ (Associates, s. d.)

- « Les NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) sont des représentations mathématiques de la géométrie en 3D pouvant décrire avec précision toute forme [...] Grâce à leur flexibilité et à leur précision, les modèles NURBS peuvent être utilisés dans n'importe quels processus, tels que l'illustration, l'animation ou la fabrication

dépendance aux résultats d'analyses traditionnelles menées sur site, ce qui réduit le modèle à une simple représentation des résultats de l'étude stratigraphique proprement dite.

Conclusion du chapitre :

Issue principalement du domaine archéologique, la méthode stratigraphique a été introduite pour l'étude et la compréhension du patrimoine bâti diachronique. Conçue initialement selon les principes et les règles propres à la logique de déposition et d'enfouissement des sites archéologiques, elle visait à accompagner l'acte destructif de l'excavation. Structurée en un ensemble de tâches et de phases, cette approche permettait d'enregistrer à la fois le processus de fouille et les données irrémédiablement détruites au cours de celle-ci.

Son application à l'architecture s'est faite avec l'émergence de l'archéologie du bâti et l'évolution des pratiques de restauration des monuments historiques. Adaptée aux structures construites, la méthode stratigraphique a révélé ses limites ainsi que ses divergences par rapport à la méthodologie archéologique classique, ouvrant la voie à une réflexion critique sur ses modalités d'application dans le domaine architectural.

L'essor de l'industrie 4.0 et l'intégration des technologies de l'information et de la communication dans l'étude architecturale ont marqué une mutation méthodologique majeure. L'adoption de ces outils a profondément transformé les pratiques traditionnelles fondées sur les principes archéologiques, soulignant la nécessité d'adapter les méthodes et procédés aux disciplines et aux objets d'étude, et non l'inverse.

Partant de ce constat, le chapitre suivant propose une approche ad hoc destinée à l'étude de la stratification des œuvres du patrimoine bâti. Il s'appuie sur les principales disparités entre stratigraphie archéologique et stratigraphie architecturale mis en lumière dans le présent chapitre, pour la proposition d'une méthode recentrée sur les objectifs et finalités propres à l'étude du patrimoine bâti.

Conclusion de la partie I :

Cette première partie thématique a permis d'explorer en profondeur la problématique de recherche, d'en préciser la spécificité et la portée, tout en dégageant les limites et les points d'ancrage sur lesquels s'articulera notre intervention.

Le premier chapitre a apporté un éclairage fondamental sur la notion de stratification architecturale, envisagée comme un phénomène intrinsèque au bâti et distinct des formes géologiques et archéologiques de stratification. Cependant, à l'instar de ces dernières, la stratification architecturale résulte d'un processus génétique lent et complexe, reposant sur des logiques propres et des fondements multiples. Afin d'en comprendre les mécanismes, nous avons retracé les origines des pratiques de reconstruction sur l'ancien et de réemploi des ressources matérielles et spatiales préexistantes.

Cette investigation a permis de révéler, au-delà de la dimension diachronique qui sous-tend la stratification, son caractère intentionnel, justifiant ainsi son intérêt, ses valeurs et son rôle dans la constitution des œuvres patrimoniales. Qu'elle résulte d'une volonté politique, d'une expression stylistique ou symbolique, ou encore d'une nécessité économique ou fonctionnelle, la stratification traduit toujours un choix fondé. Cette lecture a permis de dépasser la vision réductrice selon laquelle la stratification du bâti ne serait qu'une altération de l'œuvre initiale, imposée par le temps et perçue comme une modification subie. En la restituant comme un acte réfléchi et motivé, elle devient un objet lisible et intelligible, dont la complexité apparente peut être déchiffrée par une analyse rigoureuse et approfondie.

Dans le prolongement logique de ce qui précède, le deuxième chapitre s'est attaché à examiner la stratigraphie en tant que discipline scientifique de lecture et d'analyse de la stratification— issue des sciences géologiques et archéologiques — et à en évaluer la transposition au domaine du patrimoine bâti. ce chapitre a permis de revisiter ses fondements, d'analyser ses principes et ses règles sous-jacentes, ainsi que les procédés mobilisés pour son application à l'architecture. L'étude critique des différentes méthodes développées a mis en évidence leurs limites, leurs évolutions successives et les modalités d'adaptation qui ont conduit à l'émergence d'une stratigraphie des œuvres bâties. Cette analyse a permis de souligner les divergences existant entre les conditions d'étude de la stratification architecturale et la méthode archéologique conventionnelle. Le tableau. 2 présentes une synthèse des principales disparités relevées entre ces deux approches dans le cadre de notre recherche.

Nous nous sommes également intéressés aux avancées technologiques et méthodologiques récentes dans l'étude et le traitement du patrimoine bâti, en soulignant les apports des outils numériques, les changements de paradigmes méthodologiques et les nouvelles perspectives qu'ils ouvrent. Cette analyse a mis en évidence les potentialités, mais aussi les lacunes et les défis persistants, qui orientent désormais la réflexion vers la recherche d'approches intégrées et adaptées aux spécificités de notre objet d'étude à savoir les œuvres historiques stratifiées et composites.

En somme, cette première partie a permis d'établir un cadre théorique et critique solide, de cerner les besoins méthodologiques propres à l'analyse du bâti stratifié et de dégager les orientations de recherche nécessaires à la formulation d'une proposition originale.

La deuxième partie s'inscrit dans cette continuité. Elle se veut résolument pragmatique et productive, en articulant développement méthodologique et validation expérimentale. S'appuyant sur les constats et enseignements issus de cette première phase exploratoire, elle proposera une approche renouvelée, pensée en réponse aux limites identifiées et fondée sur les apports des technologies numériques et des avancées contemporaines dans le domaine de l'analyse du patrimoine bâti globalement et des œuvres stratifié plus spécifiquement.

Tableau 2: Écarts entre la méthode de Harris et les exigences méthodologiques propres à l'étude de la stratigraphie architecturale.

Critères	La méthode stratigraphique consensuelle (la méthode Harris)	Enjeux / exigences de la stratigraphie architecturale
Nature de l'approche	Méthode destructive —excavation des sites—	Lecture non destructive
Sources des données	Données recueillies in-situ —les couches déblayées—	Analyse du bâti, contexte architectural, contexte sociale, contexte urbain, documentation historiques...etc
Visées de l'étude	Retracer les formes des établissements humains historiques à travers leurs manifestations matérielles	La compréhension de la genèse morphologique, et les dynamiques structurelles pour la conservation et la durabilité des œuvres patrimoniales
Fondements	La stratigraphie archéologique est unidirectionnel est basée sur les quatre lois stratigraphiques établies par Harris (voir supra, §2.1.2.a « i »)	La stratigraphie architecturale se développe de façon multidirectionnelle et n'obéit pas aux lois de la stratigraphie archéologiques déterminées par Harris

Constitution	La stratification archéologique prend en considération les échofacts (matières sédimentaires) et les artéfacts	La stratification architecturale traite exclusivement les éléments artéfactuels
modélisation et représentation	La modélisation de la stratification se fait par l'organisation séquentielle de la déposition La représentation de l'ordre et de la logique stratigraphique se fait à travers la matrice Harris	La modélisation de la stratification architecturale se fait par la représentation de sa multi-dimensionnalité spatiale, morphologique, et chronologique. L'organisation séquentielle de la morphogénèse doit représenter les permanences, les transformations, et les intervalles
Identification des entités stratigraphiques	L'identification des composantes de la stratification archéologique s'effectue in situ, au fur et à mesure de leur mise au jour par déblaiement	L'identification des composantes de la stratification peut être effectuée selon diverses modalités : inspection visuelle, reconnaissance documentaires, traitement et extraction algorithmique des données ...
Position des unités dans l'ensemble	En archéologie, une unité stratigraphique ne peut appartenir qu'à une seule phase chronologique.	En architecture, une unité stratigraphique peut être assignée à plusieurs phases —réutilisation ultérieure, permanence...

Documentation historique	La détermination des différentes phases et périodes historiques ne relève pas à proprement parler de l'étude stratigraphique, mais constitue une étape du travail post-excavation	L'étude historique constitue une étape inhérente à l'analyse stratigraphique architecturale et peut être mobilisée tant pour l'identification que pour l'organisation des données stratigraphiques.
L'enregistrement des données stratigraphiques	Les données stratigraphiques recueillis sont transcrites sur un ensemble de dessins 2D (plans et sections), des fiches, et des une matrice bidimensionnelle	En raison de son caractère polymorphe, la stratification architecturale n'est intelligible qu'à travers une approche tridimensionnelle
L'organisation chronologique	En stratigraphie archéologique, l'ordre chronologique repose essentiellement sur la séquence de déposition des différentes couches — artefacts compris.	En architecture, l'organisation chronologique est une séquence d'alternance permanences/ transformations
Workflow	L'approche Harris pour la lecture stratigraphique repose sur un flux de travail dissocié (excavation / post-excavation	L'introduction des technologies TIC en architecture favorise l'intégration des données, l'interopérabilité et l'interactivité.

II. Deuxième partie : Cadre méthodologique et expérimental

Introduction de la partie II

Après avoir approfondi, dans la première partie, la thématique de la stratification et de la stratigraphie, en mettant en évidence leurs spécificités en architecture historique, leur évolution ainsi que les enjeux méthodologiques qui en découlent, cette seconde partie mettra l'accent sur l'élaboration d'une méthodologie ad hoc appliquée à l'étude de la stratification architecturale, en tenant compte de ses particularités, de ses principes sous-jacents et des évolutions récentes dans le domaine.

Elle se compose de deux chapitres :

- Le troisième chapitre s'attachera à définir les exigences et les finalités propres à une stratigraphie architecturale, en les distinguant de celles de la stratigraphie archéologique. Dans ce cadre, nous proposerons un modèle conceptuel mettant en lumière les principaux concepts à mobiliser lors de l'étude des bâtiments dits « multicouches », afin d'offrir un cadre commun et consensuel aux différents acteurs du patrimoine bâti. Sur la base de ce modèle, nous développerons ensuite les diverses modalités d'investigation permettant d'identifier et d'exploiter les concepts définis, dans le but d'interpréter et de comprendre la genèse stratigraphique et, ce faisant, de produire des connaissances concernant les bâtiments étudiés.
- Le quatrième chapitre sera consacré à l'expérimentation du *workflow* proposé, à travers une étude stratigraphique appliquée à un cas d'étude concret : la zaouïa « Sidi Rached », édifiée à l'extrémité sud du rocher historique de Constantine. L'application de notre méthode à ce cas, permettra d'en évaluer l'efficacité, les apports et les avancées par rapport à la méthode stratigraphique de Harris. Cette mise à l'épreuve nous offrira l'occasion de valider — ou, le cas échéant, de remettre en cause — l'approche proposée comme méthodologie stratigraphique ad hoc pour les œuvres du patrimoine bâti.

Troisième chapitre : Proposition d'une méthode stratigraphique dédiée au patrimoine bâti

Introduction du chapitre

Comme cela a été constaté dans les chapitres précédents, la stratigraphie archéologique — conçue principalement pour le suivi et l'enregistrement de l'acte destructif de l'excavation, en vue de comprendre et de retracer l'ordre de déposition et d'enfouissement des sites et des ensembles anthropiques anciens — repose sur des principes qui ne sont pas valides lorsqu'il s'agit d'architecture et d'œuvres bâties. En effet, ni les entités constitutives, ni la logique de composition, ni les modalités de lecture et d'investigation ne correspondent à la genèse stratigraphique du bâti.

Cependant, l'idée même de concevoir la stratification comme un ensemble hétérogène, composé de sous-ensembles élémentaires —plus ou moins— homogènes, organisés selon un certain ordre et définissant entre eux des rapports internes, constitue une approche pertinente pour l'analyse et la compréhension de la stratification architecturale des œuvres historiques.

C'est à partir de ce principe que nous avons élaboré notre propre méthode. Dans une perspective visant à développer une approche aussi complète que possible, nous proposons la mise en œuvre d'un système d'informations dédié à la stratification architecturale, intégrant l'ensemble des données, le processus d'investigation ainsi que les outils et procédés employés. En identifiant d'abord les exigences, les objectifs et les spécificités de la stratification architecturale, nous présentons un modèle conceptuel inspiré de la logique de Harris, permettant de représenter le phénomène de stratification en architecture. Ce modèle est enrichi par l'introduction de variables propres à la lecture et à l'interprétation du bâti historique et servira de fondement pour déterminer et structurer les différentes procédures et outils nécessaires à l'analyse, à l'interprétation et à la compréhension de la stratification du patrimoine bâti.

Nous abordons ensuite, le processus analytique à proprement parler, en définissant les différentes méthodes de collecte, de traitement, d'enregistrement ainsi que d'interprétation et de représentation des résultats. Pour ce faire, nous nous appuyons principalement sur les avancées récentes des technologies de l'information et de la communication (TIC), afin d'assurer une exploitation optimale et fiable des données.

Enfin, nous présentons un outil conçu spécialement pour l'intégration et la visualisation en temps réel des différentes données et informations produites, offrant une représentation multimodale et interactive des diverses dimensions spatiales, morphologiques et chronologiques de la stratification architecturale

3.1. Impératifs, enjeux, et principes fondateurs d'une stratigraphie architecturale :

L'étude de la stratification architecturale a pour principal objectif de retracer et de comprendre l'évolution génétique et chronologique de la morphologie des œuvres du patrimoine bâti diachronique. La conservation des édifices historiques repose en effet sur deux axes fondamentaux : d'une part, la mise en évidence et la valorisation de leurs différentes dimensions patrimoniales ; d'autre part, la compréhension approfondie de leurs formes, de leur dynamique constructive et de leur comportement structurel, afin d'assurer leur longévité et leur préservation.

Dans cette perspective, l'analyse stratigraphique permet de révéler la richesse historique des monuments, de mettre en lumière les pratiques constructives anciennes, ainsi que les motivations et les contextes ayant conduit à leurs transformations successives. Elle contribue ainsi, à restituer une partie de l'histoire des sociétés et des territoires à travers la mise en lumière de leurs savoir-faire architecturaux, artistiques et les événements qui ont marqué leur évolution.

Par ailleurs, l'étude stratigraphique offre un moyen pour appréhender le comportement structurel et statique des bâtiments, tout en identifiant les causes de leurs détériorations. Elle met en évidence les interactions entre les différentes unités constructives et leurs impacts respectifs sur l'ensemble du bâtiment, permettant ainsi, d'établir un diagnostic précis et de planifier des interventions adaptées.

Dès lors, il apparaît impératif que les acteurs du patrimoine bâti disposent des moyens nécessaires pour lire et interpréter ce phénomène omniprésent dans les œuvres historiques, ainsi que des outils et méthodes appropriés pour en assurer l'étude et la compréhension. Cela suppose, avant tout, de reconnaître la spécificité de l'étude de la stratification architecturale en dehors des méthodes d'excavation archéologique et de fonder l'analyse stratigraphique sur des principes et des bases propres aux artefacts bâtis, à leurs particularités, ainsi qu'aux objectifs visés par leur mise en valeur et leur conservation.

3.1.1. *Divergences entre stratigraphie architecturale et stratigraphie archéologique :*

Comme exposé dans le chapitre précédent, la stratigraphie architecturale constitue une adaptation de la méthode stratigraphique archéologique aux œuvres bâties. Plusieurs études fondées sur l'application de la méthode Harris à l'architecture historique (Discamps et al. 2023) (Hoggett, Richard 2000) (Roskams 2020), ainsi que les discours développés par les acteurs de la restauration en Italie (voir supra, chapitre 2, § 2.1.2.b), ont permis de mettre en évidence les

divergences entre les conditions d'étude de la stratification architecturale et la méthode généralement admise.

Le tableau synthétique comparatif présenté plus haut met en évidence, d'une part, les limites de la méthode traditionnelle de Harris dans l'étude et la compréhension de la stratification des œuvres bâties, et, d'autre part, les exigences méthodologiques propres à l'analyse de la stratification architecturale. Ces constats constituent le point de départ pour l'élaboration d'un modèle conceptuel. Celui-ci a pour objectif de représenter le phénomène de stratification architecturale en définissant et en structurant ses différentes composantes. Il offre également une base commune aux acteurs du patrimoine bâti, afin d'orienter leurs pratiques analytiques et d'unifier leur cadre de travail.

3.1.2 : proposition d'un modèle conceptuel sous-jacent :

Définir un modèle de données conceptuel consiste à décrire, de la façon la plus complète possible, un champ d'expertise donné et à en proposer une représentation schématique en mettant en évidence ces concepts fondamentaux. Ce modèle doit également, assurer une organisation rigoureuse des entités du domaine en spécifiant leurs attributs et en illustrant leur articulation au moyen des différentes relations qui les unissent.

Au cours des dernières décennies, plusieurs modèles conceptuels ont été développés dans le champ du patrimoine culturel. Leur objectif principal est de standardiser les lexiques et les entités mobilisés par les praticiens, de manière à unifier les systèmes de documentation et les modalités d'intervention. Avec l'essor de l'interdisciplinarité, de l'interactivité et de l'interopérabilité, favorisant l'échange et le partage des données à grande échelle, ces modèles ont été progressivement standardisés et formalisés —pour devenir lisibles et manipulables par les machines— et enrichis de logiques et de moteurs de raisonnement automatiques. On parle désormais d'ontologies, dont le rôle est d'encadrer sémantiquement des domaines ou sous-domaines d'expertise, en unifiant et structurant les concepts et connaissances propres à une même communauté scientifique, tout en garantissant cognition automatique et interopérabilité.

Parmi les modèles conceptuels de référence dans le domaine du patrimoine figure le CIDOC-CRM (International Committee for Documentation- Conceptual Reference Model)(Bekiari et al. 2024), élaboré par l'ICOM¹⁵. Il s'agit d'une ontologie normalisée regroupant et organisant les connaissances liées au patrimoine culturel, et offrant un cadre commun aux acteurs

¹⁵ Le conseil international des musées

présente comme un assemblage de pans constructifs, spatiaux et temporels intégrées dans un même artefact. Ainsi, dans notre modèle conceptuel, nous concevons les bâtiments stratifiés comme des entités à la fois physiques et chronologiques, imbriquées dans l'espace.

Afin d'assurer l'alignement avec le cadre commun établi du patrimoine culturel, nous avons fondé la définition de notre modèle sur le CIDOC-CRM et sur certaines de ses extensions pertinentes pour notre domaine d'étude [voir annexe. B] :

- CRMsci (modèle pour l'observation scientifique)(Doerr et al. 2023) : destiné à l'organisation des données et métadonnées acquises au cours du processus d'investigation. Il peut être relié aux concepts de l'ontologie mère afin de générer de nouveaux croisements. Il se compose de classes désignées « S+n° » et de propriétés désignées « O+n° ».
- CRMba (modèle pour l'archéologie du bâti)(Ronzino et al. 2016) : conçu pour la documentation et l'organisation du champ de l'archéologie du bâti. Il propose un ensemble de classes désignées par « B+n° » et de propriétés annotées par « BP+n° ». Cette ontologie formalise notamment les notions mobilisées dans la stratigraphie Harrisienne.
- CRMarchaeo (modèle pour l'archéologie)(Christaki et al. 2023) : schéma de représentation des activités d'excavation archéologique et des tâches connexes. Il regroupe une série de classes représentées par « A+n° » et de propriétés par « AP+n° ».

Le tableau.3 démontre des exemples de codification de différentes entités des modèles susmentionnés

Tableau 3: Exemples de classes et propriétés de l'ontologie CIDOC-CRM et ses extensions

Le modèle conceptuel	ID classe	classes modélisées	ID propriété	propriétés modélisées
CIDOC-CRM	E+n°	E19: Physical Object	P+n°	P46: is composed of
CRM-sci	S+n°	S10: Material Substantial	O+n°	O11: described

CRM-archaeo	A+n°	A9: Excavation Interface	AP+n°	AP28: occurs before
CRM-ba	B+n°	B1: Built Work	BP+n°	BP1: is section of

Ainsi, à partir d'une analyse approfondie de la stratification en tant que phénomène morphologique, nous avons élaboré un vocabulaire conceptuel ad hoc destiné à notre modèle conceptuel, que nous avons articulé avec différentes composantes des modèles précédemment présentés. Le tableau 4 synthétise l'ensemble des concepts mobilisés pour la construction de notre modèle.

Tableau 4: Classes externes référencées par le modèle conceptuel proposé

Nom de la classe	Identifiant	Le modèle source
Temporal entity	E2	CIDOC-CRM version: 7.1.3
Period	E4	CIDOC-CRM version: 7.1.3
activity	E7	CIDOC-CRM version: 7.1.3
Time-Span	E52	CIDOC-CRM version: 7.1.3
Beginning of Existence	E63	CIDOC-CRM version: 7.1.3
Transformation	E81	CIDOC-CRM version: 7.1.3
SpaceTime Volume	E92	CIDOC-CRM version: 7.1.3
Stratigraphic Interface	A3	CRMarchaeo version: 2.0
Morphological Building Section	B2	CRMba version: 1.4
Stratigraphic Building Unit	B5	CRMba version: 1.4

3.1.2.1: L'artéfact stratifié [Stratified Building 'SB']:

Ce concept constitue une sous-classe de l'entité « E92_SpaceTime-Volume » définie par le CIDOC-CRM. Il est caractérisé comme un ensemble bâti diachronique, formé de succession d'unités constructives synchroniques, reliées entre elles par des rapports topologiques et chronologiques. L'intelligibilité de ces relations repose à la fois sur l'analyse approfondie des surfaces du bâti — qui révèle la morphologie et la configuration de la stratification — et sur l'examen rigoureux des données historiques et contextuelles, permettant d'en éclairer l'évolution et la signification.

3.1.2.2 : Composantes stratigraphiques des artéfacts [Building' stratigraphic sub-entities 'Bse'] :

Dans notre modèle, l'artéfact stratifié 'SB' représente l'entité principale, à décomposer en ses différentes composantes, elle est constituée de :

a. L'unité stratigraphique bâtie : [Stratigraphic building unit 'SBU'] :

Ce concept constitue une sous-classe du concept 'artéfact stratifié' dans notre modèle. Il s'agit d'une entité reprise du modèle CRM-ba, définie sous l'identifiant 'B5' comme « *instance d'objet physique représentant l'unité minimale de construction... »*¹⁶.

L'unité stratigraphique bâtie désigne un ou plusieurs fragments issus d'une même action constructive délibérée, établissant un synchronisme entre les différentes parties qu'elle englobe. Chaque unité est caractérisée par les types de matériaux employés, les techniques constructives, les formes et fonctions des éléments au sein du bâti, ainsi que leur position dans l'espace référentiel.

Chaque SBU est délimitée par des interfaces stratigraphiques, telles qu'identifiées dans le modèle CRM-archaeo sous la désignation "A3". Ces interfaces définissent les limites de chaque SBU par rapport aux unités contiguës appartenant à d'autres instances antérieures ou postérieures.

¹⁶ Traduction de l'auteur d'après (Ronzino et al. 2016)

À ces caractéristiques et attributs hérités des modèles existants, nous ajoutons dans notre modèle les éléments suivants :

- Une SBU peut être spatialement dispersée et répartie de manière non uniforme, selon l'intention initiale des bâtisseurs ou à la suite de modifications ultérieures (ex : un ensemble de colonnes utilisées lors d'une même phase de construction / reconstruction)
- Une SBU peut être associée à différentes phases ou périodes historiques, en raison de réutilisations, réaffectations ou réemplois, témoignant de l'évolution et de la continuité du bâti dans le temps (ex : une opération d'anastylose).

Ainsi, la définition proposée met en évidence l'insuffisance de l'inspection visuelle à elle seule, pour identifier les SBU —contrairement à la pratique archéologique— et souligne la nécessité d'une analyse pluridisciplinaire pour une lecture correcte et holistique des données.

b. L'Unité Chronologique [Chronological unit 'ChU'] :

L'unité chronologique est définie comme un ensemble de SBU regroupées au sein d'un intervalle délimité, constituant ainsi une entité temporelle conformément à la classe 'E2' du modèle CIDOC-CRM. Les différentes SBU rassemblées dans une même unité chronologique sont reliées par des rapports de synchronisme, même si leurs dates d'occurrence et de fin ne coïncident pas —comme par exemple plusieurs parties construites dans diverses activités appartenant à la même époque historique. En revanche, les SBU appartenant à des unités chronologiques distinctes sont reliées par des rapports d'antéropostériorité.

Les unités chronologiques peuvent présenter différentes granularités, selon le cas d'étude et les objectifs poursuivis. Elles peuvent représenter des événements (E5), des activités (E7) ou des périodes (E4).

La définition d'unités chronologiques à différentes résolutions temporelles, permet de mieux appréhender les différentes phases de transformation des artefacts tout au long de leur cycle de vie. En effet, la morphologie des bâtiments et des sites historiques peut ainsi, être appréhendée à travers la description d'activités (construction, modification, réparation, extension...), d'événements (assaut ou destruction d'une partie de la ville, modernisation des lieux, industrialisation du bâti...), ou encore en termes de périodes historiques (tracé de la cité romaine, tissu de la ville islamique, style classique de l'époque française...).

Cette approche offre une lecture plus fine et structurée des évolutions architecturales et urbaines, en reliant de manière cohérente les unités élémentaires aux dynamiques temporelles plus larges.

c. Le cycle stratigraphique [Stratigraphic cycle 'SC'] :

Le cycle stratigraphique peut être défini comme une sous-classe de l'entité « Présence », désignée dans le modèle CIDOC-CRM sous l'identifiant 'E93'. Il représente la morphologie, l'état figuratif, esthétique et structurel de l'artéfact au cours d'un intervalle temporel déterminé 'E52', ou ce qu'il en subsiste dans l'état des lieux actuel.

Chaque cycle stratigraphique résulte de la transformation du cycle qui le précède. L'état du bâtiment au moment de son étude (état des lieux) est ainsi considéré comme le dernier cycle stratigraphique de son existence jusqu'à cette date. Il convient de noter que des changements d'affectation fonctionnelle ou de propriétaires, peuvent intervenir successivement au sein d'un même cycle stratigraphique.

La (figure. 33) illustre les différents cycles stratigraphiques du pont El Kantara à Constantine, retraçant les principales phases d'évolution et de transformation qu'a connues l'ouvrage de 1765 à nos jours (HAOUACHA 2015). Les images présentent les cycles stratigraphiques suivants (de haut en bas et de gauche à droite) :

SC1 : [1765- 1792] : le pont avant les travaux de restauration entrepris par le bey Salah. (Source du croquis : J. Bruce.1765)(Playfair 1877).

SC2 : [1792- 1857] : le pont el Kantara après les travaux de restauration entrepris par Salah-bey, et achevés par Hussein-bey (source de la photographie : J. Moulin Felix. 1850)

SC3 : [1857- 1860] : l'état du pont après l'effondrement des piles de l'étage supérieur en 1857 (peinture de Eliza Angel.1861)

SC4 : [1860- 1951] : la construction du nouveau viaduc avec arche unique en acier par l'administration française, et la réparation de l'aqueduc en siphon antique en contrebas (source : DeGolyer Library, Southern Methodist University. 2013).

SC5 : [1951-] : réparation de l'arche du pont après le détachement du parement nord, et la construction de la nouvelle arche en béton en 1951, et transformation de l'aqueduc en siphon

—effondré durant la chute du parement— en escaliers d'accès au le chemin des touristes
(source : auteure. 2014)

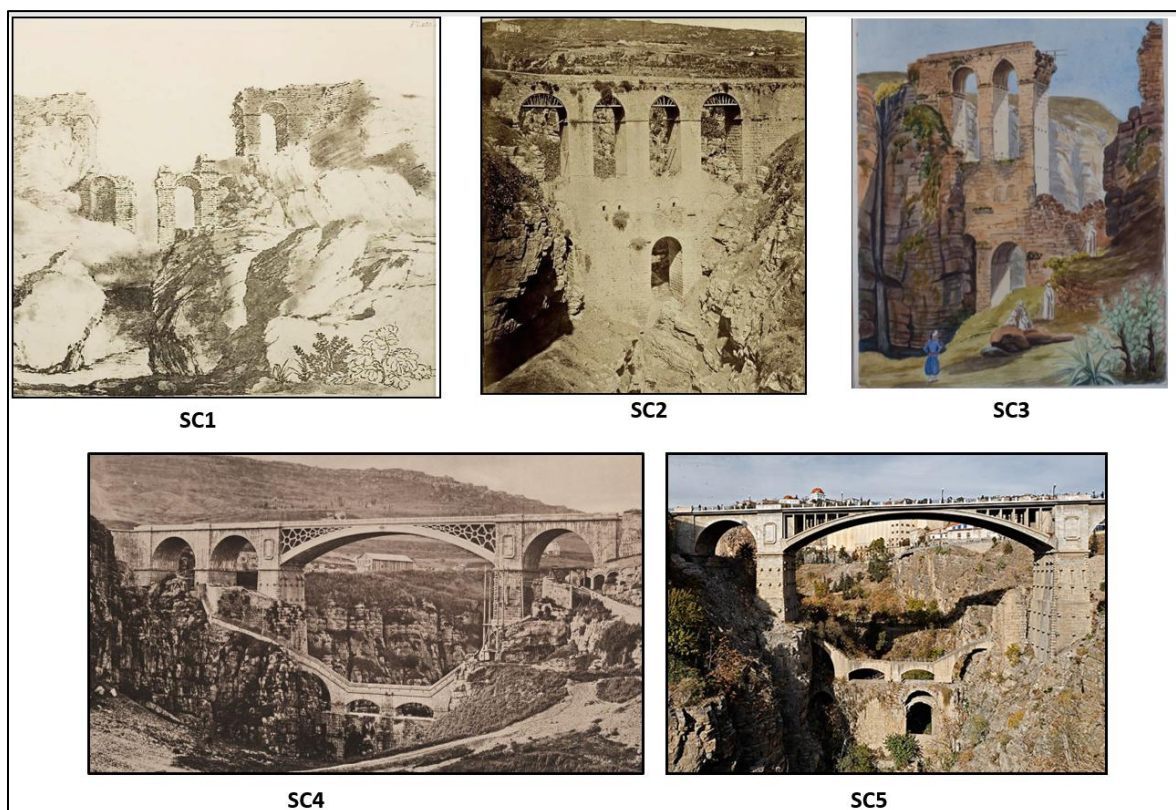


Figure 33: Différents cycles stratigraphiques du pont El Kantara de Constantine

d. La durée de vie des artefacts [Artefact lifespan 'ArLs'] :

Il s'agit de l'ensemble des cycles stratigraphiques 'SC' et des transformations 'E81' qui se succèdent tout au long de la séquence chronologique des œuvres, constituant ainsi la trame de leur genèse morphologique. Elle s'étend sur l'ensemble de l'intervalle temporel compris entre la phase initiale de construction — la plus ancienne connue et documentée — et les transformations les plus récentes observées ou enregistrées.

La durée de vie de l'artefact englobe donc la totalité de ces cycles et de ces états successifs, qu'ils soient matériellement conservés, disparus, ou seulement reconstitués hypothétiquement par interprétation archéologique ou documentaire, ou restitution architecturale. Elle correspond, en d'autres termes, à la trajectoire évolutive de l'édifice dans le temps, traduisant la continuité de son existence physique et sémantique à travers ses multiples phases de transformation.

La durée de vie des artefacts demeure potentiellement extensible, tant que les structures en question continuent d'exister, même partiellement. Chaque modification, extension,

réaffectation ou changement, aussi radical soit-il, est considéré comme une nouvelle entité stratigraphique venant compléter et actualiser la durée de vie des artefacts ('ArLs').

Ainsi, le processus évolutif des œuvres bâties, s'inscrit dans une dynamique cumulative, où chaque intervention, qu'elle soit intentionnelle ou subie, participe à enrichir leur stratification architecturale, offrant une lecture diachronique de leur transformation et de leur permanence.

L'ensemble des concepts présentés ci-dessus constitue le modèle conceptuel que nous proposons. Notre élaboration s'inscrit dans une démarche d'alignement avec l'évolution sémantique standardisée dans la sphère du patrimoine culturel, afin d'en garantir la compatibilité avec les normes préexistantes et d'ouvrir la voie à une éventuelle formalisation future —développement d'une ontologie de domaine pour la stratification architecturale sur la base de notre modèle conceptuel.

Le tableau 5 expose la structuration taxonomique de notre modèle, tandis que la figure 34 en offre une représentation globale, mettant en évidence les concepts ainsi que les relations — ou propriétés — qui les unissent. Précisons que, tout comme les concepts, ces relations sont issues des modèles conceptuels mobilisés (ontologies).

Notre modèle conceptuel, ainsi défini, constitue le socle théorique et structurel de notre approche. Il servira de référence pour les développements méthodologiques et les applications présentées dans les points suivant, où nous démontrerons son opérationnalisation dans le cadre de l'étude de la stratification du bâti historique.

Tableau 5: Organisation hiérarchique des classes du modèle conceptuel proposé

E92	SpaceTi			
	me			
	volume			
SB	—	—	Stratified	
			building	
BSe	—	—	Building	
			sub_entities	
ArL	—	Artefa		
s		ct		
		lifespa		
		n		
E63	—	—	Beginning of	
			existence	
E81	—	—	Transformati	
			ons	

											building unit
A3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Stratigraphic interface

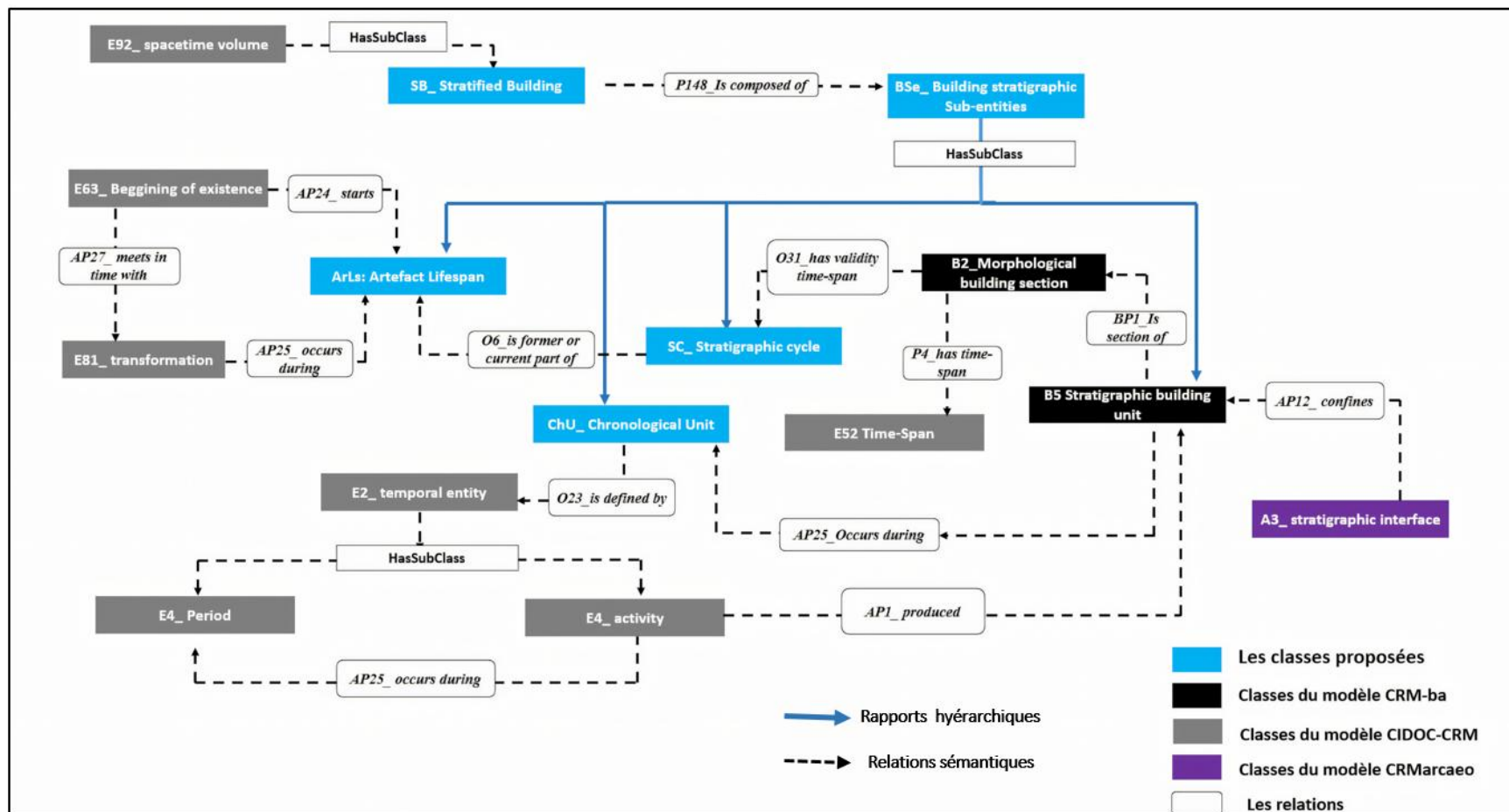


Figure 34: Modèle conceptuel de données proposé pour la stratigraphie architecturale.

Source: Haouacha et al, 2025

3.2. Présentation de l'approche développée pour la stratigraphie architecturale :

Une fois les différentes entités élémentaires permettant la compréhension des œuvres bâties diachronique déterminées, à travers le modèle conceptuel proposé, il est important de définir les différentes modalités et méthodes permettant de les identifier, de les exploiter et de les organiser dans le but d'une compréhension globale de la genèse morphologiques du bâti stratifié.

3.2.1. *Acquisition et analyse des données stratigraphiques :*

3.2.1.1 : collecte et acquisition des données stratigraphiques :

La stratigraphie architecturale requiert une analyse minutieuse des surfaces bâties afin d'identifier les différentes entités constitutives des œuvres. Dans cette perspective, un relevé optimal et d'une grande précision s'avère indispensable. Les modèles 3D issus de la capture de la réalité de l'environnement bâti, représentent aujourd'hui un outil fondamental pour l'étude et la valorisation du patrimoine architectural (Ferdani et al. 2020). Qu'il s'agisse de maquettes numériques sous forme de nuages de points, de maillages, de modèles voxélisés ou modèles paramétriques (Figure.35) , ces représentations ont marqué une transition décisive, permettant de déplacer l'investigation du terrain vers un espace de travail virtuel interactif. Elles offrent ainsi de nouvelles possibilités en matière d'accessibilité, de manipulation, d'archivage et d'analyse des biens patrimoniaux (Ham, Bae, et Yuh 2020) (Trizio et al. 2021).

Ces maquettes numériques autorisent par ailleurs, une approche à la fois globale et détaillée du bâti, à différents niveaux de résolution (Remondino et al. 2009). Une telle profondeur d'analyse est essentielle pour appréhender la genèse morphologique des édifices, dépassant les limites des représentations traditionnelles en élévations, plans et coupes 2D. Elles peuvent, en outre, être enrichies par l'intégration de données hétérogènes (Messaoudi et al. 2018) (Ferdani et al. 2020), favorisant l'interprétation et la compréhension des édifices grâce au croisement des données rattachées et à la visualisation des multiples sources d'information.

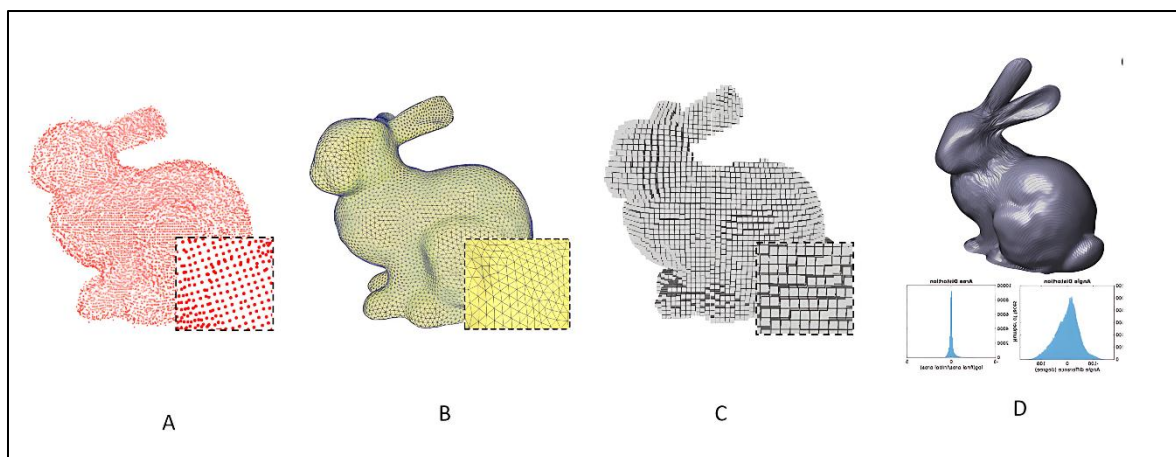


Figure 35: Différents types de modèles 3D : A : nuage de point, B : maillage, C : modèle voxelisé, D : modèle paramétrique.

Source : A, B, C : Chenlei Lv et al, D : G. Choi et M. shaqfa, Traitement : auteure

Aujourd'hui, les techniques de télédétection —remote sensing— appliquées à l'acquisition de données spatiales, constituent une pratique courante dans l'inventaire du patrimoine architectural. Les capteurs actifs, tels que les scanners laser/Lidar, permettent de produire en temps réel des nuages de points denses offrant une précision métrique et géométrique remarquable (Wu et al. 2022). Toutefois, leur coût élevé, les compétences techniques requises et la relative complexité de leur maniabilité —notamment en terrains accidentés et densément urbanisés— demeurent des freins à la généralisation de leur adoption (Rüther et al. 2012).

Dans cette lignée, de nombreuses recherches se sont orientées vers les approches « scan-to-BIM » (Logothetis, Delinasiou, et Stylianidis 2015) (Brusaporci et Maiezza 2016), soulignant leurs avancées en matière de représentation, d'intégration et de gestion des données (Pepe et al. 2021) comme illustré dans la (figure.36). Néanmoins, la nature des biens patrimoniaux stratigraphiques —souvent caractérisés par des morphologies complexes, des éléments fait mains non standardisés, et des altérations causées par le passage du temps, les interventions humaines et les facteurs climatiques— rend l'application de modèles BIM strictement paramétriques, hautement controversée pour représenter fidèlement leurs caractéristiques irrégulières, souvent inachevées, et multiformes (Pili 2019), essentielles à une lecture stratigraphique pertinente.

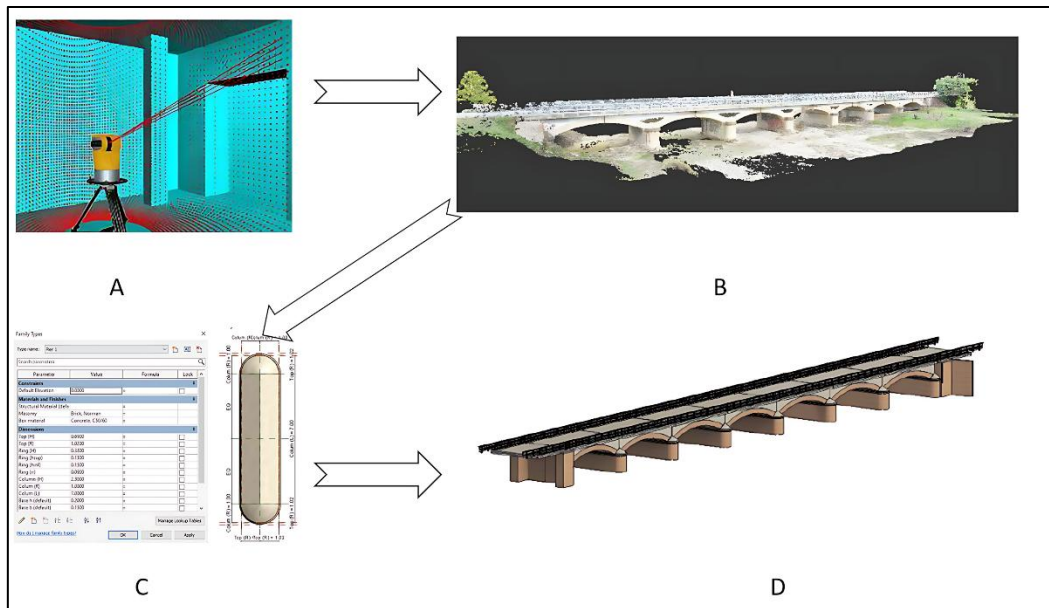


Figure 36: Procédure Scan-to-BIM : A : capture des données via Scanner laser, B : nuage de point généré, C : modélisation des familles paramétriques, D : modèle paramétrique.

Source : L. Pinho. Traitement auteur.

En complément, les approches de modélisation basées sur la photographie —Image-Based Modeling ‘IBM’— connaissent un essor considérable dans le domaine du patrimoine bâti(Sužiedelytė-Visockienė et al. 2015). Elles offrent une solution efficace pour la récupération de données spatiales, notamment grâce à des pipelines de photogrammétries(Griwodz et al. 2021) et Structure-from-Motion (SfM) désormais automatisés, personnalisables, accessibles et souvent disponibles sous forme de logiciels open source(Pamart, Morlet, et De Luca 2019). Ces techniques présentent un large spectre d’applications : elles peuvent être mises en œuvre à différentes échelles — de l’élément constructif ou du détail technique à l’ensemble urbain, en passant par les maquettes et objets muséaux(Macher et al. 2017). Divers modes de capture(Stojakovic et Bajsanski 2013)— photogrammétrie terrestre, aérienne ou satellitaire, à courte ou moyenne portée — permettent d’obtenir une couverture complète et détaillée des artefacts, avec un degré de précision adaptable aux objectifs visés. La (figure. 37) illustre une procédure de capture 3D photogrammétrique

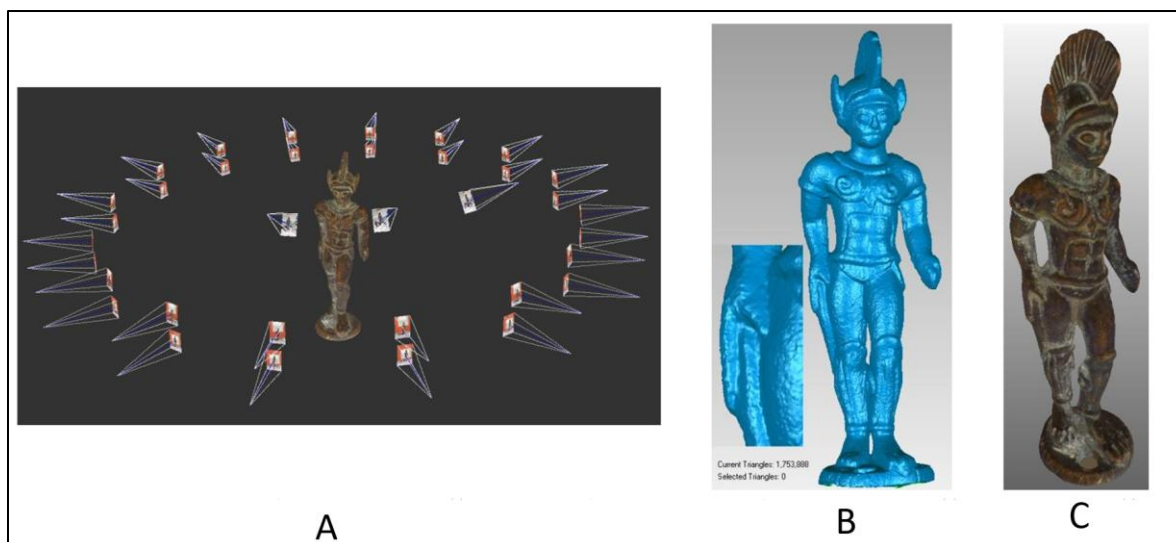


Figure 37: Reconstruction photogrammétrique. A : calcul des positions des images, B : génération d'un maillage, C : projection de la texture.

Source : C. Nicolae et al. 2014

Ainsi, en fonction du contexte, des finalités et des moyens disponibles, il est possible de sélectionner et de combiner différentes méthodes pour l'étude du bâti. L'association de techniques, telles que les processus « scan-to-BIM » (Artopoulos et al. 2023), (Santoni et al. 2021) ou l'intégration de la photogrammétrie avec le balayage laser (Campisi, Giuliano, et Liuzzo 2019) constituent aujourd'hui des approches particulièrement pertinentes pour documenter, analyser et interpréter la stratigraphie architecturale de manière exhaustive et précise.

3.2.1.2: Traitement et analyse des données pour l'identification des composantes stratigraphiques :

La première étape d'une étude stratigraphique consiste à identifier les différents sous-ensembles ou régions stratigraphiques représentant les unités stratigraphiques du bâti, généralement au moyen d'une opération de segmentation. Dans le cas des bâtiments multicouches, cette segmentation en unités stratigraphiques repose principalement, sur la détection des interfaces, matérialisées par des discontinuités dans les types et formes de matériaux (Forster et al. 2023), des variations dans les techniques constructives, ainsi que par l'hétérogénéité structurelle et stylistique. Traditionnellement, cette tâche était réalisée par inspection visuelle directe des surfaces bâties in situ. Il demeure cependant indispensable d'intégrer des informations sémantiques et historiques lors des phases post-segmentation et d'organisation chronologique, afin d'éviter des interprétations erronées liées à certaines configurations particulières, telles que

les réparations à l'identique, la réutilisation de matériaux anciens ou encore les altérations dues à la dégradation et au vieillissement de l'édifice.

Dans le cadre de la manipulation de maquettes numériques issues de la capture 3D de la réalité, la segmentation des surfaces peut être réalisée soit par inspection visuelle humaine directement sur le modèle 3D généré, soit au moyen de techniques de vision par ordinateur — *computer vision* — dans la diversité et l'ampleur de leurs procédés, ou encore par des méthodes hybrides combinant ces deux approches.

Pour ce qui est de la segmentation manuelle, elle constitue une méthode de subdivision entièrement contrôlée, reposant sur l'expertise humaine. L'opérateur supervise l'ensemble du processus, en s'appuyant sur une analyse minutieuse par visualisation des surfaces et sur l'interprétation subjective de données complémentaires, notamment historiques (Papaleo et Floriani 2010). Si cette approche garantit une compréhension fine et contextualisée, elle peut néanmoins devenir laborieuse et chronophage pour des structures de grandes dimensions ou à forte densité constructive (Malinverni et al. 2019), augmentant ainsi le risque d'omissions ou d'erreurs d'interprétation.

Parallèlement, la segmentation automatique et semi-automatique, largement explorées dans la littérature scientifique (Shamir 2008) (Nguyen et Le 2013) (Eleonora Grilli et al. 2018), repose sur des algorithmes de vision par ordinateur capables d'analyser en profondeur les données d'entrée — modèles 3D/ 2D/ 2.5D — afin d'en extraire les caractéristiques pertinentes et de les regrouper en régions homogènes, définies selon divers attributs — formes, valeurs colorimétriques, planéité, proximité... etc — comme démontré dans la (figure. 38). Si ces méthodes offrent des perspectives intéressantes en termes d'automatisation, leur efficacité reste fortement tributaire de la qualité et de la complexité des modèles 3D : bruit, densité et distribution hétérogènes, données non structurées, occlusions et valeurs aberrantes, constituent autant de problème pour le traitement des données 3D. Pour y remédier, plusieurs approches innovantes ont été proposées. (Manuel et al.) (Manuel, Luca, et Véron 2014) ont proposé de transférer les régions annotées manuellement sur les images des artefacts vers leurs coordonnées 3D correspondantes dans le nuage de points, généré par photogrammétrie. Ce transfert s'effectue au moyen d'une relation bijective établie grâce à la spatialisation des photographies autour du modèle 3D. De la même manière, (Pellis et al.) (Pellis et al. 2021) ont développé une annotation par rétroprojection, reposant sur une segmentation plus fine des

images, réalisée via apprentissage profond, puis appliquée au modèle 3D selon un principe analogue.

(Grilli et al.)(Eleonora Grilli et al. 2018) ont, quant à eux, proposé une approche similaire, directement appliquée au maillage obtenu par le relevé 3D établi sur site. Les images sur lesquelles a été réalisée la segmentation, ont été générées par dépliage du maillage 3D en cartes UV bidimensionnelles. Celles-ci ont ensuite, fait objet de segmentation/ classification par apprentissage automatique, supervisée, avant d’être projetée à nouveau sur le maillage initial sous forme de texture.

Enfin, plus récemment, plusieurs travaux(Murtiyoso et al. 2022) (Stathopoulou et Remondino 2019) ont été consacrés à l’intégration de la phase de transfert d’annotations directement au sein du processus photogrammétrique. La segmentation et l’annotation sont ainsi réalisées sur l’ensemble des photographies en amont, fournissant un jeu de données enrichi, servant de base à la reconstruction, ouvrant la voie aux prémices de ce qui sera désigné sous la notion de “photogrammétrie sémantique”.

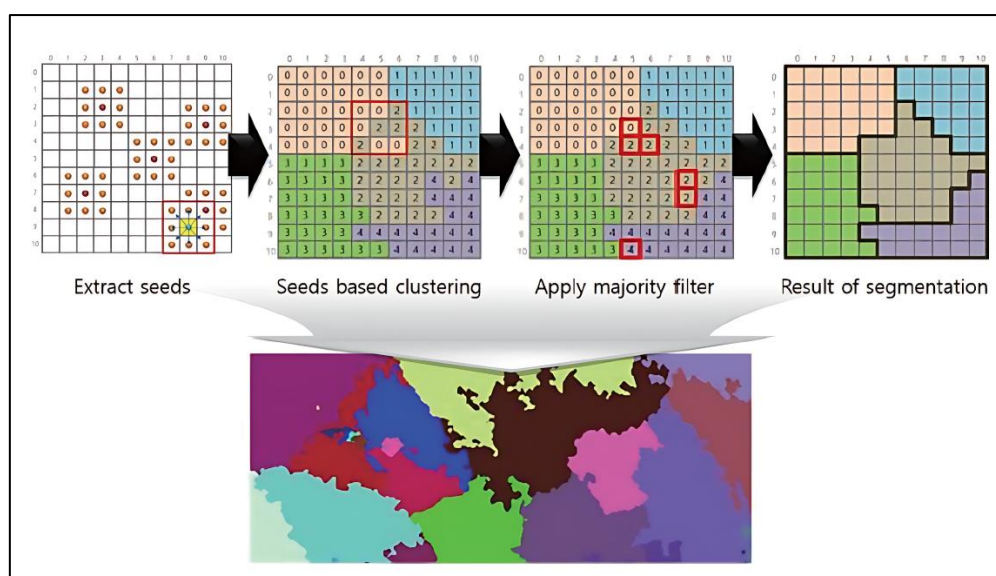


Figure 38: Segmentation par croissance des régions autour d’un point de référence (pixel semence).

Source: D. Lee et al. 2019

Dans la continuité de ces recherches, plusieurs travaux se sont orientés vers la segmentation appliquée directement aux modèles 3D. À cet égard, Valero et al. ont proposé une méthode de segmentation automatique de la maçonnerie, fondée sur l’utilisation de la transformée en

ondelettes continue bidimensionnelle —2D Continuous Wavelet Transform¹⁷— permettant de classifier les blocs de maçonnerie pierre par pierre. Leur approche consiste à générer, à partir du nuage de points 3D, une projection plane orthogonale dite 2.5D, sur laquelle la méthode CWT 2D est appliquée à la carte de profondeur afin d'isoler le mortier et de mettre en évidence les contours des blocs individuels.

Dans la même perspective, (Vandenabeele et al.)(Vandenabeele et al. 2023) ont mobilisé des réseaux de neurones convolutifs appliqués à des ortho-photographies issues de relevés photogrammétrique, afin de segmenter individuellement les briques dans des édifices en maçonneries de grande échelle. Les éléments ainsi identifiés, ont ensuite, été regroupés en clusters homogènes à l'aide d'un langage de programmation visuel, dans le but de caractériser les différentes phases constructives (figure.39). Enfin, (Park et al.)(Park et Cho 2021) ont, pour leur part, développé une approche d'apprentissage profond tridimensionnel pour la classification des matériaux de construction à partir de nuages de points, combinant simultanément la couleur, les coordonnées spatiales et l'intensité laser. Cette approche se révèle particulièrement prometteuses pour la segmentation stratigraphique.

¹⁷ La transformée en ondelettes continues bidimensionnelle (2D-CWT) est une méthode d'analyse multi-échelle utilisée pour balayer une image — ou, dans ce cas précis, les orthophotos obtenues à partir d'un nuage de points 3D — en vue de détecter les variations locales d'intensité, de texture ou de géométrie. En capturant ces discontinuités à différentes échelles, elle permet d'effectuer la segmentation des surfaces et la classification des éléments selon leurs propriétés structurelles et spectrales.

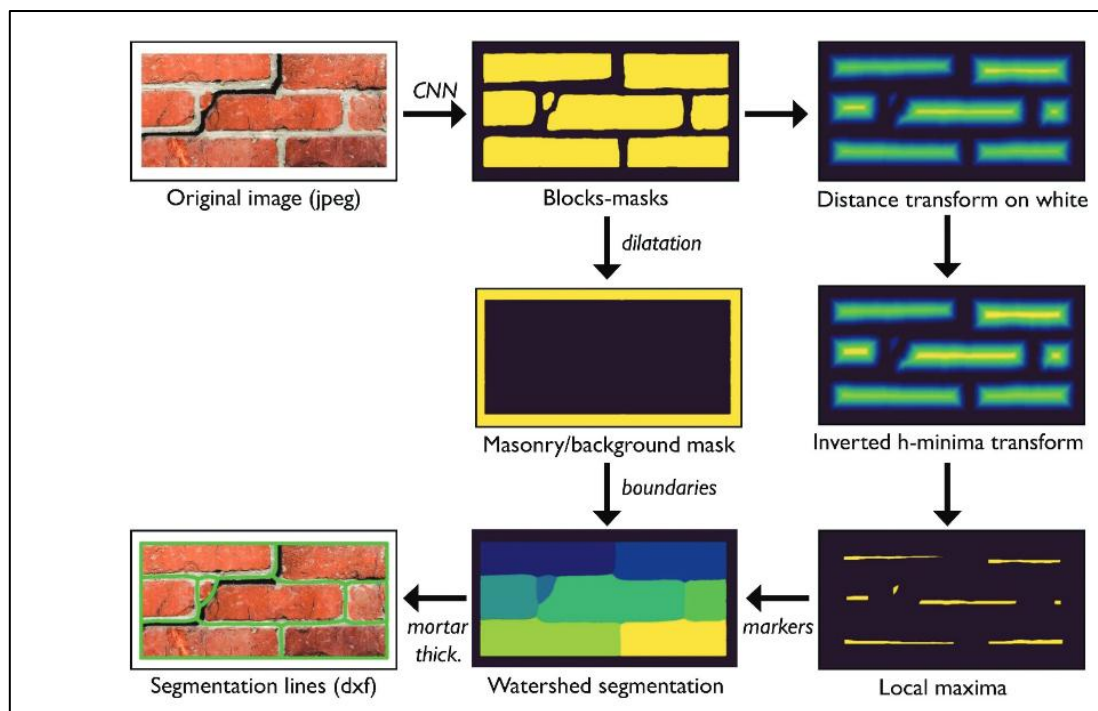


Figure 39: Méthode de segmentation automatique pierre à pierre.

Source : L. Vandenabeele. 2023

En somme, il apparaît que la combinaison de la robustesse et de l’objectivité des méthodes automatiques — aptes à exploiter une large variété de paramètres et à traiter efficacement des volumes massifs de données — avec la précision interprétative et la richesse contextuelle apportées par les ajustements manuels, issus d’investigations historiques, archivistiques et expertes, constitue une voie particulièrement féconde. Une telle approche hybride permet, non seulement, d’obtenir des résultats plus fiables et exhaustifs, mais également de garantir leur pertinence scientifique dans l’analyse et l’interprétation stratigraphique.

Outre les données spatiales et géométriques, l’analyse approfondie de la documentation historique et archivistique des œuvres et de leur contexte, constitue une étape indispensable pour appréhender pleinement leur dimension temporelle et diachronique. Cette démarche permet, d’une part, de confronter les résultats obtenus lors de l’identification des unités stratigraphiques — établies à partir des données spatio-morphologiques offerts par les relevés 3D — aux descriptions et informations issues des sources historiques disponibles ; et, d’autre part, de replacer ces unités dans une dynamique temporelle structurée, en établissant leur progression historique, afin d’identifier les phases d’évolution, les différentes unités chronologiques ainsi que les cycles stratigraphiques propres au bâti.

La constitution et l'exploitation d'un corpus documentaire varié sont à cet égard fondamentales. Les récits des voyageurs, des géographes et des artistes des époques passées représentent une source d'une richesse considérable, permettant, non seulement, le recoupement et la mise en perspective des données actuelles avec celles du passé, mais également la lecture critique des permanences, des transformations, ainsi que du processus d'évolution et de développement des lieux et des sociétés. Toutefois, ces témoignages textuels, bien que précieux, présentent souvent un caractère subjectif : leur exactitude peut être limitée, influencée par l'idéalisation de l'auteur ou tributaire de l'interprétation relative du lecteur. Ils sont alors complétés par l'examen de documents graphiques et d'archives couvrant les différentes périodes d'occupation. Dans ce contexte, plans anciens, relevés, croquis, dessins techniques et artistiques, ainsi que photographies historiques, constituent des sources plus fidèles à la réalité matérielle, offrant un niveau d'objectivité et de précision supérieur aux descriptions littéraires. Leur analyse comparée permet de retracer les étapes successives de transformation des édifices et d'identifier des continuités ou des ruptures majeures dans leur évolution.

À cela s'ajoute l'étude des travaux scientifiques antérieurs consacrés à l'architecture et aux techniques constructives historiquement employées, tant à l'échelle du site qu'à celle de la ville ou de la région. Ces recherches apportent des repères essentiels pour la compréhension des savoir-faire locaux, des pratiques récurrentes et des conditions techniques, artistiques, technologiques ou économiques qui ont façonné le bâti au fil du temps. Elles offrent ainsi des indices d'interprétation solides pour valider des hypothèses, formuler des scénarios d'évolution et saisir la spécificité morphologique et constructive des structures étudiées.

3.2.2. visualisation et représentation de la genèse stratigraphique et la séquence chronologique :

3.2.2.1. Représentation de la diachronicité et modélisation des intervalles temporels

Comme nous l'avons souligné plus haut (Ch. 2, § 1.2.1.2 (iii)), l'apport fondamental de la méthode de Harris à l'étude stratigraphique réside dans l'introduction explicite de la dimension chronologique et dans la représentation des séquences de construction et de conformation des sites archéologiques (Harris 2017). Toutefois, la matrice de Harris propose une organisation abstraite de la genèse stratigraphique, en écartant toute information descriptive relative à l'état des lieux pour se concentrer sur la modélisation logique des successions, fondée sur les quatre principes de sa théorie. Le diagramme ne rend compte que des relations d'ordre relatif entre les unités recensées, en excluant toute donnée de datation absolue, d'estimation de durée ou de coexistences temporels.

Les travaux post-fouille vont cependant au-delà de la simple séquence de déposition (Taylor et May 2024) en intégrant la matrice stratigraphique dans un niveau chronologique supérieur à savoir le temps historique, et en organisant les unités en groupes, phases ou périodes (Discamps et al. 2023). Les matrices de Harris sont alors reconfigurées dans des feuilles de calcul, des axes d'évolution temporels ou des séquences de périodisation globale (voire figure.31.d).

Bien que cette approche ait été largement adoptée pour la transcription de la stratigraphie architecturale (Diara et Rinaudo 2020), les chercheurs du patrimoine bâti tendent à inscrire les édifices dans une trame historique plus globale, mobilisant des temporalités quantifiées telles que la datation absolue ou approximative, la mesure des durées et des intervalles, ou encore la spécification de périodes civilisationnelles jalonnant l'histoire de l'humanité. Dans ce cadre, Blaise et Dudek (Blaise et Dudek 2008) ont publié une synthèse sur l'usage des frises chronologiques, conçues non seulement comme outils de représentation temporelle, mais aussi comme instruments de visualisation séquentielle de l'évolution des biens historiques. Ils ont introduit des dispositifs graphiques générés grâce aux techniques de l'InfoVis (Dudek et Blaise 2010), tels que les 'Diachrograms' destinés à retracer l'évolution diachronique des artefacts, représentant l'alternance des permanences — matérialisées par des tracés horizontaux — et des transformations — représentées par des tracés ascendants — (Dudek et Blaise 2020) ; ainsi que les 'Variograms' décrivant les évolutions physiques — morphologiques et structurelles — et fonctionnelles au fil du cycle de vie des artefacts. Ces représentations permettent de décrire et de classifier, de façon ad hoc aux édifices diachroniques, les événements historiques, tout en intégrant les opérations constructives par le biais de marqueurs et de la mesure des durées de phases évolutives (figure.40).

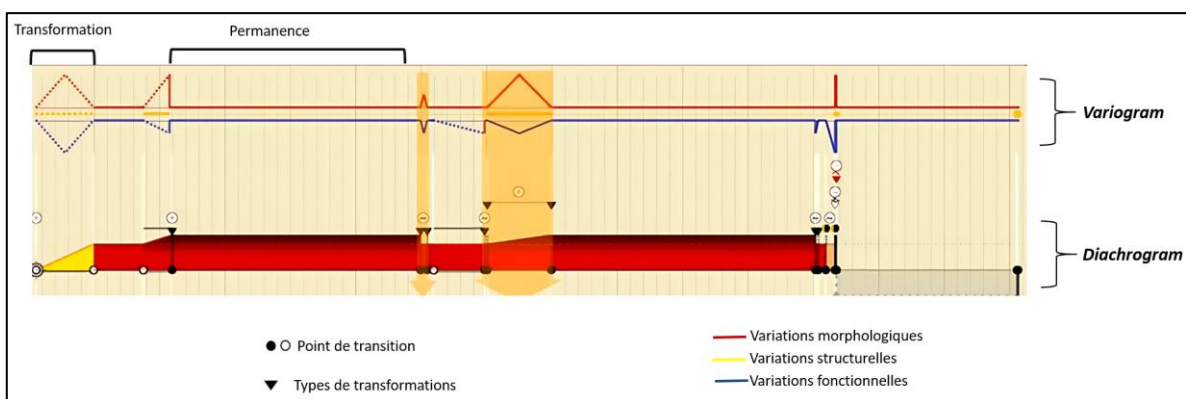


Figure 40: Modèle chronologique de Dudek et Blaise pour la lecture des transformations des artefacts patrimoniaux au cours de leur cycle de vie

Source : I. Dudek et J-Y. Blaise. 2010

Toutefois, cette approche envisage le bâtiment dans sa globalité, comme une entité unique, sans prendre en compte la double nature des unités stratigraphiques en tant qu'éléments autonomes d'une part et composantes d'un système architectural plus vaste d'autre part. Malgré leur efficacité dans la structuration des informations temporelles et sémantiques, ces outils restent insuffisants pour restituer les dimensions morphologiques et spatiales, pourtant essentielles à l'étude du patrimoine bâti.

Dans la même perspective, Stefani et al.(Stefani et al. 2009) ont proposé un diagramme chronologique dynamique, inspiré des graphes de Renolen, et rattaché aux modèles 3D pour représenter les transformations spatio-temporelles des bâtiments. L'intérêt de leur modèle réside d'une part dans la représentation simultanée des intervalles de permanence —la durée d'existence d'un état morphologique donné— et des phases de transition — progressives ou soudaines — et d'autre part dans la transcription de différentes granularités spatiales et temporelles, en fonction des sources disponibles et des objectifs analytiques (figure.41). Dans cette logique, une représentation par éléments constructifs pourrait constituer un support de lecture adéquat pour les unités stratigraphiques du bâti, chacune d'entre elles étant traduite par une frise chronologique intégrant ses phases de permanence et de transformation (figure.41.b). Toutefois, ce modèle repose sur une recherche historique préalable, permettant de reconstruire de manière hypothétique plusieurs états antérieurs, à partir desquels les frises chronologiques sont établies.

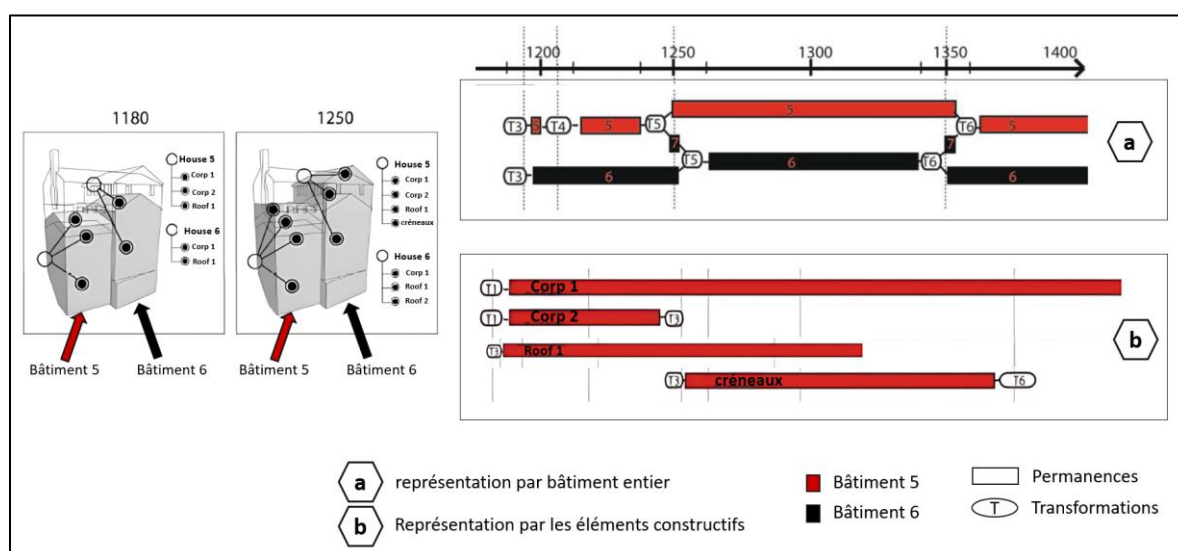


Figure 41: modèle chronologique de C. Stefani pour la représentation des transformations diachroniques du bâti historique à différentes granularités.

Source : C. Stefani. 2010. Traitement : auteure.

Dans notre cas, l'objectif premier est d'étudier l'organisation chronologique des entités stratigraphiques dans l'état actuel du bâti. Ceci pourrait constituer une base solide pour l'élaboration d'hypothèses et de propositions de reconstitution des états passés. Par ailleurs, dans le modèle stratigraphique que nous proposons, différents types d'unités sont organisés dans le temps historique : les unités stratigraphiques du bâti (SBU), modules élémentaires des complexes morphologiques dotés à la fois de fonctions structurelles et figuratives ; les unités chronologiques (ChU), correspondant à la transcription des événements, phases ou périodes ; et enfin les cycles stratigraphiques (SC), définissant les œuvres comme une succession de configurations morphologiques distinctives.

En nous appuyant sur les travaux présentés ci-dessus, nous proposons un graphique temporel sous la forme d'une frise chronologique (voir figure.42). L'axe horizontal représente le temps historique absolu, tandis que l'axe vertical traduit la séquence de succession des entités stratigraphiques définies. Dans notre modèle, les nœuds de la matrice de Harris sont remplacés par des axes temporels superposés correspondant aux unités stratigraphiques bâties, identifiées par leurs codes respectifs (ID). Les relations d'antéro-postériorité, traditionnellement figurées par des arêtes dans la matrice de Harris, sont ici exprimées par les positions respectives des unités le long de l'axe temporel, offrant ainsi une lecture plus claire et nuancée du développement diachronique du bâtiment. Les unités stratigraphiques synchrones sont encapsulées dans des champs plus larges correspondant à leurs unités chronologiques. Quant aux cycles stratigraphiques, ils sont délimités par deux curseurs verticaux, marquant le début et la fin d'une période au cours de laquelle un ensemble d'unités stratigraphiques compose une morphologie particulière — ou ce qu'il en subsiste — dans la genèse du bâtiment.

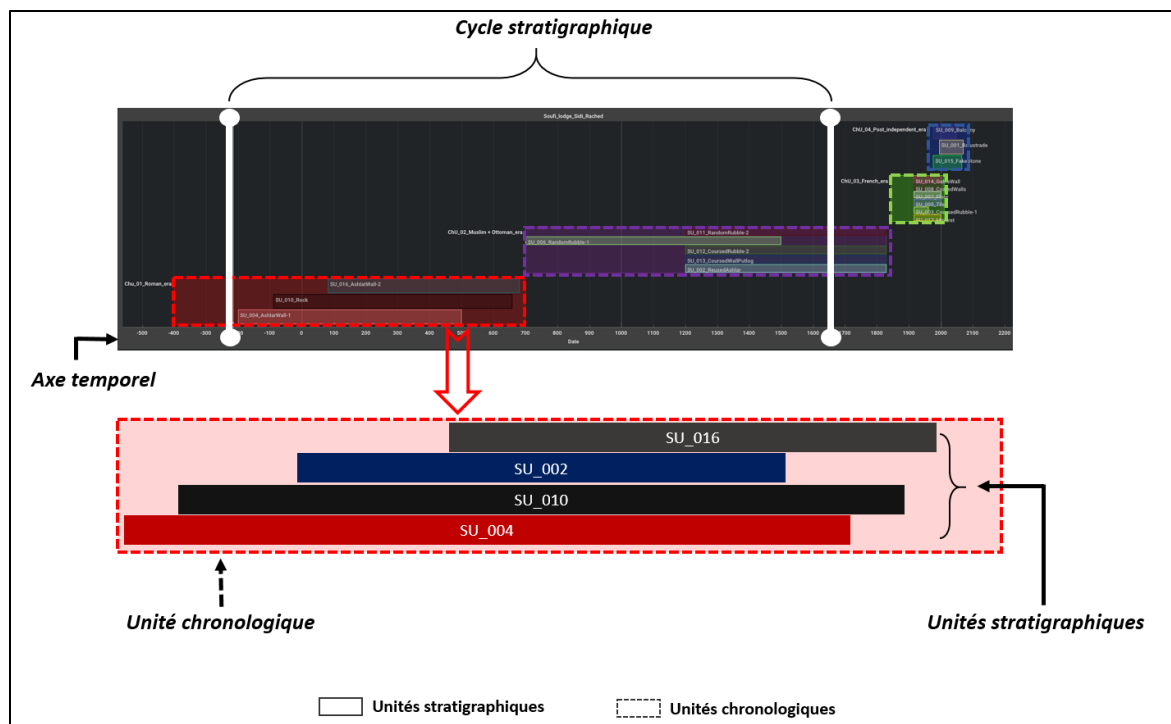


Figure 42: Frise chronologique séquentielle pour la représentation de la stratigraphie architecturale.

Source : auteure.

3.2.2.2. Visualisation multimodale et multidimensionnelle de la stratification du bâti

Avec l'essor des technologies d'acquisition et de reconstruction fondées sur la réalité, les modèles 3D ont acquis un rôle central dans l'étude du patrimoine historique. Ils dépassent désormais leur fonction initiale de simple moyen de représentation pour devenir de véritables outils d'investigation, de raisonnement et de communication des connaissances. Dans le cas des œuvres patrimoniales aux configurations figuratives et sémantiques complexes, les maquettes numériques sont largement utilisées pour représenter les reconstructions temporelles d'états passés, parfois partiellement ou totalement disparus, en s'appuyant sur des analyses intégrant à la fois des données géométriques et non géométriques.

Cependant, les modèles 3D statiques présentent deux limites majeures : d'une part, ils ne rendent pas compte des processus cognitifs et analytiques ayant conduit à l'interprétation et à la compréhension globale des œuvres et des reconstitutions hypothétiques, d'autre part, ils ne permettent ni la réutilisation, ni la mise à jour des informations à mesure que progressent les connaissances scientifiques.

Pour dépasser ces limites, l'idée de l'intégration des données temporelles et sémantiques aux modèles 3D à travers l'annotation, a été adoptée. Ce procédé permet d'associer le modèle 3D à

différents types de documents — graphiques 2D et documents non graphiques — par un étiquetage conjoint. Plusieurs travaux ont fait l'objet de l'évaluation de l'apport de cette intégration pour l'étude et la compréhension des œuvres bâties historiques.

Dans ce contexte, le travail de T. Messaoudi (Messaoudi 2017) a porté sur l'annotation des altérations détectées à différentes périodes de vie des œuvres directement sur les modèles 3D. Cette approche a permis la lecture et le monitoring de l'évolution spatio-temporelle des pathologies, et la mise en évidence visuelle de la répartition des différents types d'altération en fonction des matériaux, de la nature des éléments et de leur emplacement (figure.43). Dans ces travaux, C. Busayarat (Busayarat 2010) a utilisé le modèle 3D comme base de données pour l'archivage et la structuration d'éléments architecturaux à partir de sources iconographiques des monuments, en reliant spatialement le modèle 3D avec ces références documentaires annotées grâce à une spatialisation 2D/ 3D. Dans la même lignée, C. Stefani (Stefani 2007) s'est intéressée à l'annotation temporelle des éléments bâtis, permettant la création de cartographies thématiques spatio-temporelles. Ces travaux démontrent que l'annotation multicouche, par intégration de plusieurs calques thématiques (sémantique, temporel, pathologique, stylistique, etc.), favorise le croisement visuel des données et optimise l'exploitation des informations, renforçant leur interprétation et leur compréhension.

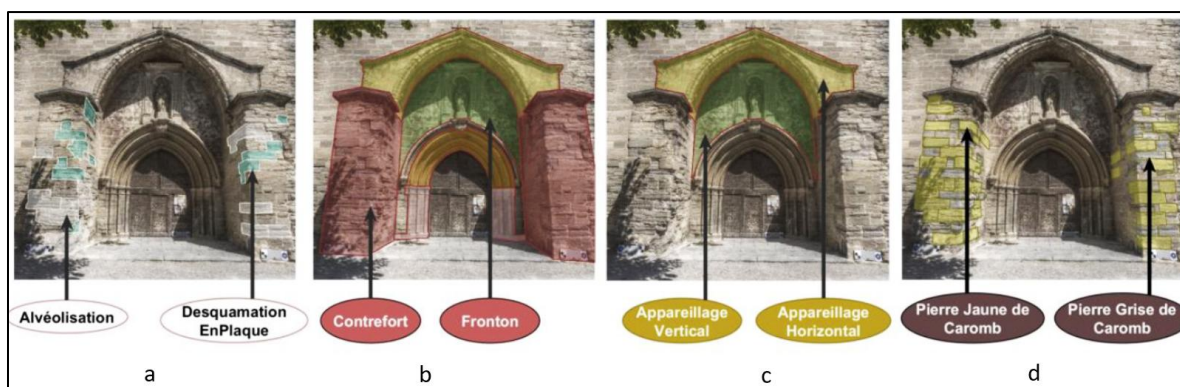


Figure 43: Annotation sémantique sur modèle 3D. a : altérations ; b : élément architectonique ; c : mise en œuvre, d : type de matériaux.

Source : T. Messaoudi. 2017

Parallèlement, le développement de logiciels et de plateformes interactives spécialisées au cours de la dernière décennie, a permis la création de modèles configurables, assurant documentation, diffusion, interopérabilité et gestion des connaissances entre divers profils d'utilisateurs (Albourae, Armenakis, et Kyan 2017) (Manuel et Abergel 2022) (Vacca, Fiorino, et Pili 2018). Plusieurs outils multitâches dédiés à l'étude du patrimoine architectural, relient

aujourd'hui des données graphiques et textuelles, ainsi que des bases de données spatiales, au sein de modèles de description sémantique enrichis par l'annotation des modèles 3D (Néroulidis et al. 2024). Ces environnements numériques facilitent le partage des données et des résultats d'analyse grâce à des workflows interconnectés — comme les applications VR et XR— élargissant considérablement le champ d'usage du patrimoine bâti et numérique (Banfi 2021).

Dans le champ des études diachroniques du patrimoine bâti, les membres du projet européen CHT2¹⁸, mené dans le cadre de l'initiative JPI-CH, (Rodríguez-Gonzálvez et al. 2019) ont développé une application évolutive destinée à représenter les différents états passés et disparus des bâtiments et sites. Leur dispositif s'appuie sur une visionneuse 4D intégrant modèles 3D, frises chronologiques et documentation historique, offrant ainsi une visualisation complète de l'évolution des différentes morphologies des édifices dans le temps (figure.44).

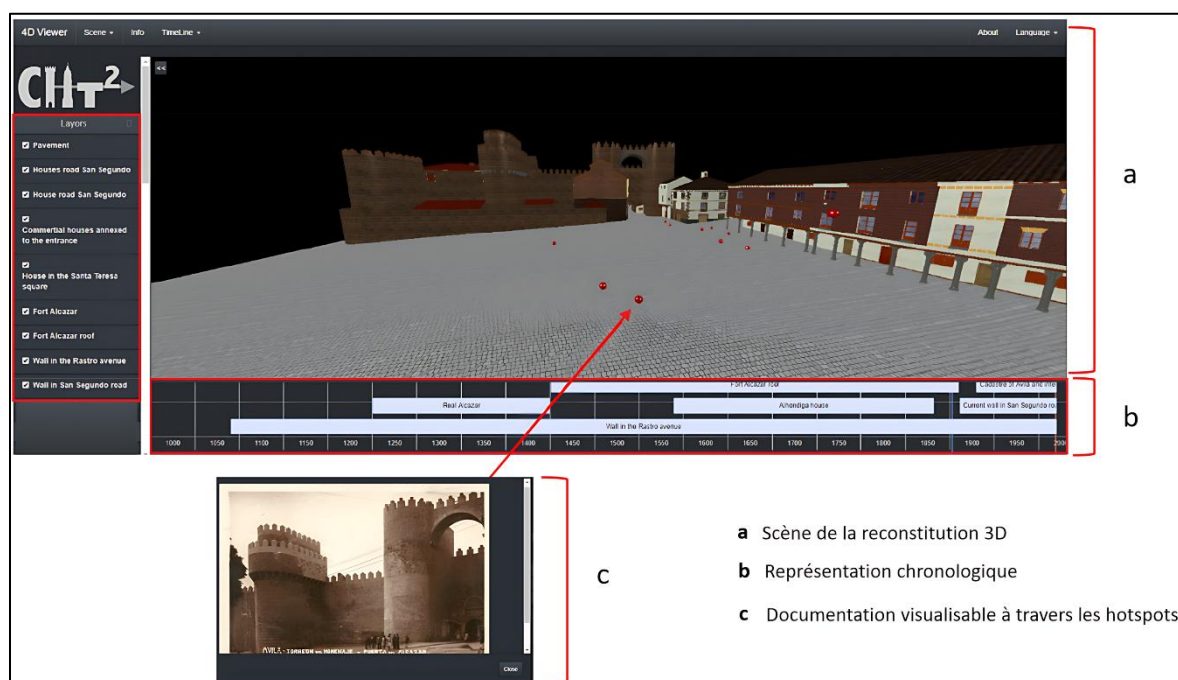


Figure 44: Interface graphique de l'application de visualisation du projet CH2T.

Source: P. Rodríguez-Gonzálvez et al. 2019. Traitement : auteure.

S'inscrivant dans cette dynamique, notre travail vise à développer une lecture rétrospective en 4D des composantes actuelles des édifices diachroniques, afin d'en révéler la genèse

¹⁸ Cultural Heritage Through Time (CHT2), est un projet réalisé dans le cadre de l'initiative européenne *Joint Programming Initiative on Cultural Heritage & Global Change (JPI-CH)*, pour l'étude spati-temporel des œuvres du patrimoine bâti.

morphologique et l'ordre stratigraphique. Cette approche constitue une étape intermédiaire vers des reconstitutions hypothétiques scientifiquement fondées, des états passés (Demetrescu 2018).

Pour atteindre cet objectif, nous avons conçu — avec l'appui d'un ingénieur en programmation — un logiciel dédié à l'intégration, la visualisation simultanée et l'exploration interactive de données hétérogènes — spatiaux, morphologiques, et temporelles — dans un environnement numérique unifié. Cet outil vise à favoriser une compréhension approfondie de la morphogenèse stratigraphique architecturale tout au long du cycle de vie des bâtiments.

Pour se faire, notre outil devait assurer trois fonctionnalités principales :

- La visualisation morphologique et spatiale via une scène 3D ;
- Organisation chronologique et navigation temporelle à travers une frise chronologique
- L'interaction en temps réel entre navigation temporelle et la scène 3D.

Le prototype développé assure l'affichage, la manipulation et la projection des données sur le nuage de points 3D ainsi que sur une frise chronologique interactive. Le programme a été développé en langage de programmation orienté objet 'C++', pour sa fiabilité et sa puissance dans l'exploration des modèles tridimensionnelles en nuages de point. L'implémentation du logiciel ainsi que son mode d'utilisation sont présentés en détail dans [les annexes. C, et D].

Le logiciel s'articule autour de trois classes principales, définies dans le modèle conceptuel élaboré (figure.45) :

- La classe Bâtiment stratifié : présente les paramètres d'affichage globaux.
- La classe Unité stratigraphique du bâti : englobe les données (ID, dates de construction, de transformation ou de dégradation) ainsi que les métadonnées (nom, couleur, calques de visualisation ...etc.) des unités stratigraphiques du bâti, et établit la correspondance aux les unités chronologiques associées.
- La classe Unité chronologique : définit les intervalles temporels et les unités stratigraphiques constituant les différentes séquences.

Bâtiment _Stratifié	Unité_Stratigraphique_Bâti	Unité_Chronologique
•name: nom du cas d'étude •Path: d'accès: pour apporter les modèles 3D segmentés •SBU: liste des unités stratigraphiques bâties •ChU: liste des unités chronologiques	•Id: identifiant unique •name: nomination des SBU •Beg_date: date d'apparition •End_date: date de disparition/ dégradation (optionel) •params: paramètres d'affichage (couleur) •pcd: nuage de point des SBU •chrono_unit: unités chronologique d'appartenance	•Name: nomination de l'unité chronologique •Beg_date: début de l'intervalle (approximatif) •End_date: fin de l'intervalle (approximatif) •Params: paramètres d'affichage •SBUs: liste des unités stratigraphiques contenues

Figure 45: L'architecture du logiciel proposé : les classes et leurs attributs.

Source : F. Haouacha et al. 2025

L'interface graphique se compose de trois volets principaux (Figure .46) :

- Panneau de données : regroupant les informations générales relatives à l'étude de cas ainsi que les attributs des entités stratigraphiques issues de la segmentation et de l'annotation des nuages de points ;
- Panneau de séquence chronologique : qui propose une vue schématique de la structure temporelle des unités, illustrant leur séquence et leur évolution, avec des codes couleur personnalisables ;
- Visionneuse 3D interactive : qui permet de restituer le modèle 3D soit avec la texture des matériaux relevés in situ, soit en mode d'affichage par calques thématique, pour représenter les unités stratigraphiques du bâti, ou les unités chronologiques ou fonction des codes couleurs attribués. Ce modèle 3D est entièrement synchronisé avec le graphe chronologique : toute modification des paramètres ou des données entraîne une mise à jour instantanée de l'ensemble.

Ainsi, ce logiciel propose une cartographie dynamique des sous-ensembles stratigraphiques directement liée au modèle 3D et à sa dimension temporelle, offrant un outil puissant pour l'analyse et la compréhension des édifices diachroniques. L'étude de cas présenté dans le chapitre suivant servira d'illustration à l'usage et au fonctionnement du logiciel.

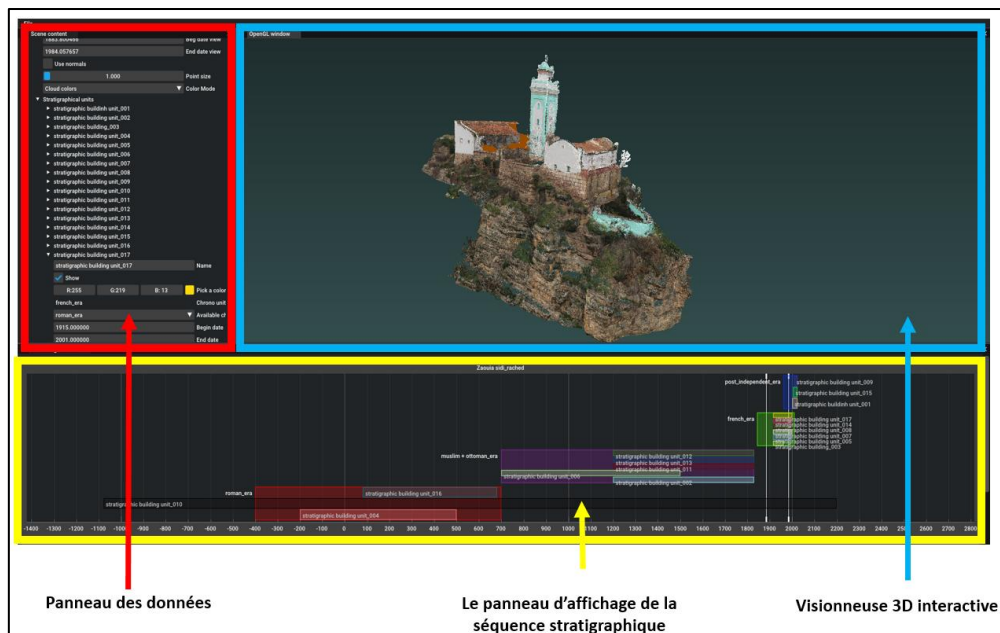


Figure 46: Interface graphique du logiciel proposé.

Source. F. Haouacha et al.2025

Conclusion du chapitre 3 :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cadre méthodologique de notre recherche ainsi que l'approche adoptée pour appréhender la stratification architecturale en tant que phénomène propre aux œuvres bâties, et nécessitant un soubassement cognitif et une méthodologie spécifiques.

Afin de mettre en évidence les particularités de la stratification du point de vue architectural, nous avons, dans un premier temps, défini et délimité le champ d'intervention, ainsi que les principaux concepts mobilisés par les acteurs intervenant sur les édifices historiques dans le cadre de leurs études stratigraphiques. Nous avons ensuite proposé un modèle conceptuel de données dédié à la modélisation de la stratification architecturale comme champ disciplinaire autonome et particulier, en précisant les concepts impliqués pour son étude, et leurs relations. Cette modélisation a été pensée dans une optique d'intégration à la communauté scientifique internationale, en privilégiant la multidisciplinarité, l'interactivité et l'interopérabilité. Pour ce faire, nous nous sommes alignés sur les modèles conceptuels de référence existants dans le vaste domaine du patrimoine culturel.

Après avoir défini les principaux concepts de la stratification architecturale, nous avons détaillé le flux de travail pour l'étude stratigraphique du bâti dans ses différentes phases, allant de la collecte, le traitement et l'interprétation des données, jusqu'aux étapes de représentation et de

visualisation des résultats. Nous nous sommes appuyés, dans notre processus, sur les avancées scientifiques et technologiques susceptibles de soutenir cette démarche.

Pour garantir la cohérence et la fluidité de l'étude stratigraphique, nous avons conçu notre méthode sous forme de système d'informations structurant l'ensemble du processus : organisation du flux de travail, structuration des données et articulation des outils et des processus autour d'un environnement commun. La figure 47 illustre les différentes phases du flux de travail proposé ainsi que la structure modulaire sous-jacente du système d'informations.

Enfin, afin d'évaluer la contribution de notre proposition à l'analyse stratigraphique du patrimoine bâti, nous présentons dans le chapitre suivant une étude de cas réalisée sur la Zaouïa de Sidi Rached à Constantine. Les étapes méthodologiques exposées dans ce chapitre y seront appliquées pour la lecture morphologique, spatiale et chronologique de l'édifice. Cette étude nous permettra non seulement d'identifier les limites de notre approche, mais aussi de mettre en lumière les difficultés rencontrées et de proposer de nouvelles perspectives d'amélioration et d'optimisation des différentes étapes du flux de travail.

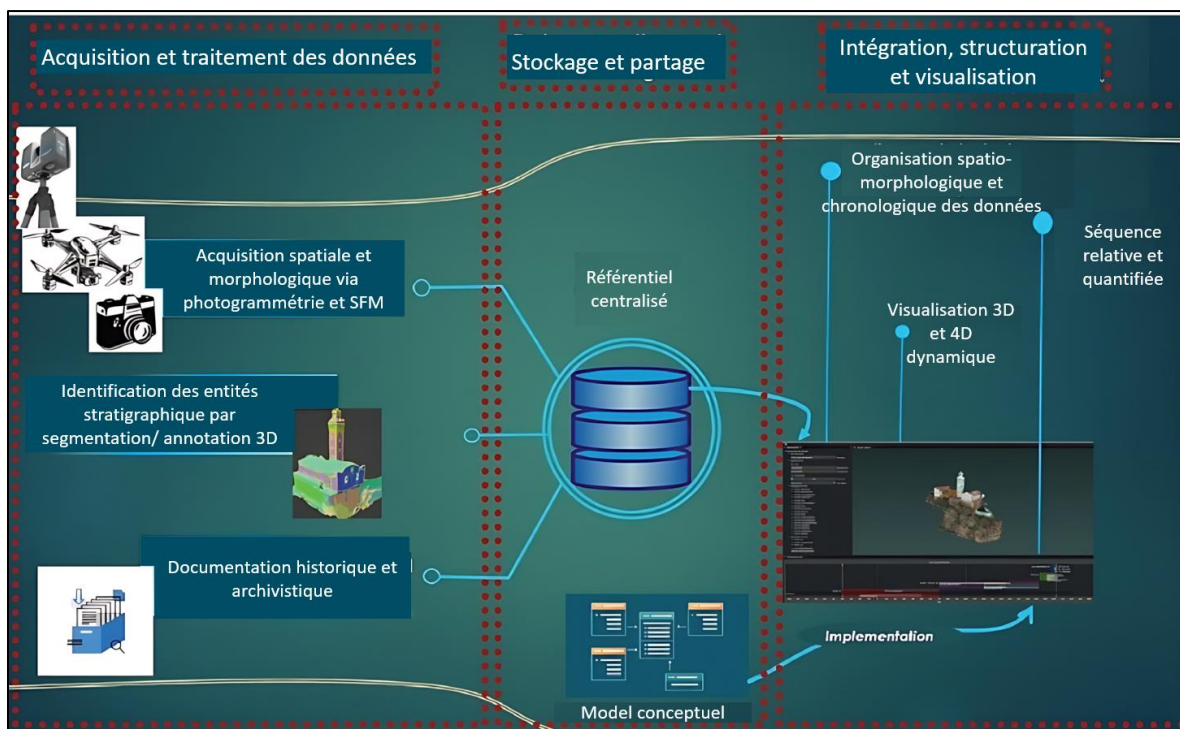


Figure 47: Infrastructure et fonctionnalités du système d'information dédié à la stratigraphie architecturale.

Source : F. Haouacha et al. 2025

Quatrième chapitre : Étude de cas : application et évaluation de l'approche proposée

Introduction du chapitre :

Comme nous l'avons montré plus haut, la méthode stratigraphique traditionnellement appliquée aux œuvres du patrimoine bâti — la stratigraphie d'Harris — présente certaines limites face aux objectifs analytiques et pratiques de leur étude. À cela s'ajoute l'évolution considérable du champ scientifique et technologique dans le domaine du traitement et de l'exploitation des bâtiments historiques, qui souligne la nécessité d'actualiser les méthodes d'investigation et d'approche.

Partant de ce constat et des besoins soulevés, nous avons présenté dans le chapitre précédent un système d'information spécifiquement dédié à la stratigraphie du patrimoine bâti. Nous y avons défini le cadre théorique et logique de notre proposition, ainsi que les principales étapes méthodologiques et opérationnelles permettant de conduire une étude stratigraphique orientée vers la compréhension de la morphogenèse des bâtiments historiques.

Afin de mettre à l'épreuve cette méthode et d'en évaluer la pertinence ainsi que les apports potentiels, nous présentons dans ce chapitre une expérimentation appliquée à l'étude d'un bâtiment historique stratifié : la Zaouïa Sidi Rached à Constantine. Érigée sur la pointe Sud du rocher historique, au premier plan de la silhouette urbaine de la cité pluriséculaire, elle constitue un artéfact patrimonial particulièrement significatif.

À travers cette étude de cas, nous détaillerons les différentes étapes du processus méthodologique développé, les procédés d'acquisition et d'exploitation des données, ainsi que les modalités d'interprétation et de représentation des résultats.

Enfin, À l'issue de cette étude expérimentale, il sera possible de dresser un bilan de notre contribution, en identifiant les apports, les limites et difficultés rencontrées, ainsi que les perspectives d'amélioration, de correction et de développement de la méthode proposée, et plus largement de l'approche stratigraphique appliquée à l'architecture.

4.1. Introduction du cas d'étude

4.1.1. Présentation de la Zaouia Sidi Rached et motivations du choix :

Juchée sur la pointe inférieure du rocher d'implantation de l'antique Cirta, la Zaouïa Sidi Rached se dresse à la lisière du canyon de l'Oued El Rhumel, au cœur de Constantine. En raison de la topographie accidentée du site, cette partie du tissu urbain s'offrait autrefois, au regard du visiteur empruntant les principales voies d'accès historiques à la cité. L'édifice occupait ainsi, une position stratégique : il se situait dans l'alignement des principales entrées de la ville, et était exposé visuellement aux collines environnantes, d'où furent menés les différents sièges de Constantine — notamment depuis Koudiat Aty à l'ouest et le plateau d'El Mansourah à l'est. Les figures (fig. 48 et fig. 49) illustrent cette position remarquable dans le vieux Constantinois.

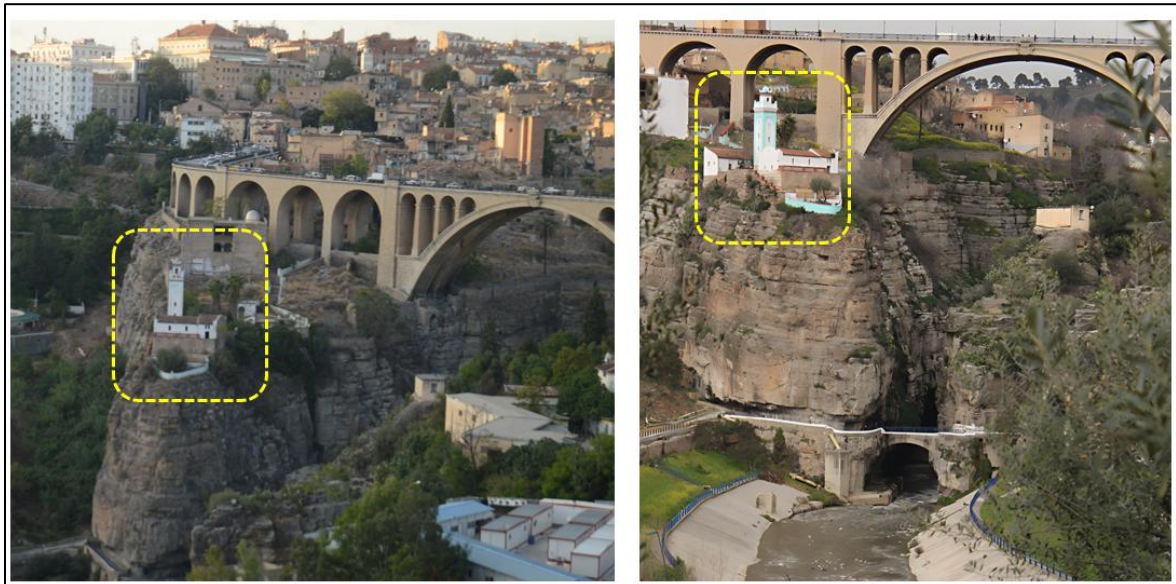


Figure 48: Emplacement du cas d'étude dominant l'entrée des gorges de Oued el Rhumel

Source : auteure.

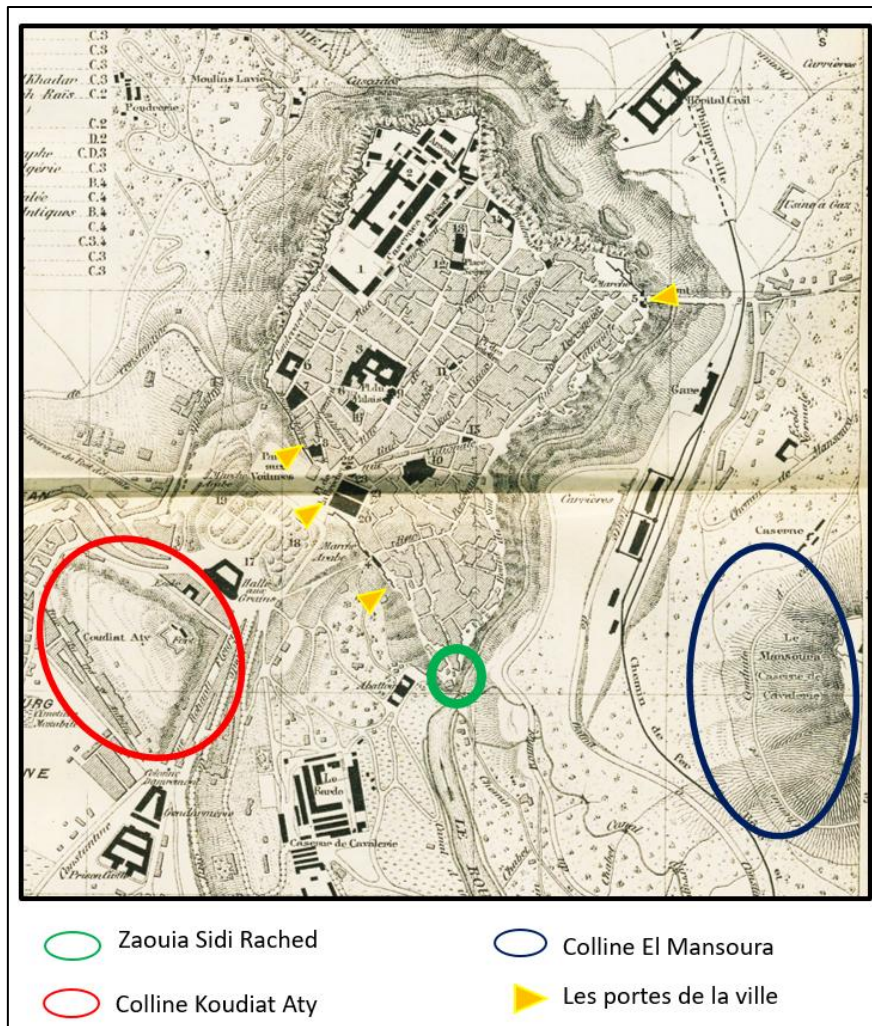


Figure 49: Carte de Constantine de 1895 illustrant l'emplacement de la Zaouia Sidi Rached dans son environnement immédiat

Source : E. Mayen. Traitement : auteure.

Sur le plan topographique, la zaouïa est implantée à 564 m d'altitude, sur la partie basse de la ville, dominant directement l'Oued El Rhumel (voir figure. 50). Elle se situe à la limite du quartier dit « arabe » de Souika, qui fut relativement épargné par les interventions de l'administration coloniale française —car le plus ancien et le plus enclavé— mais , dont la majeure partie est aujourd'hui en ruine.

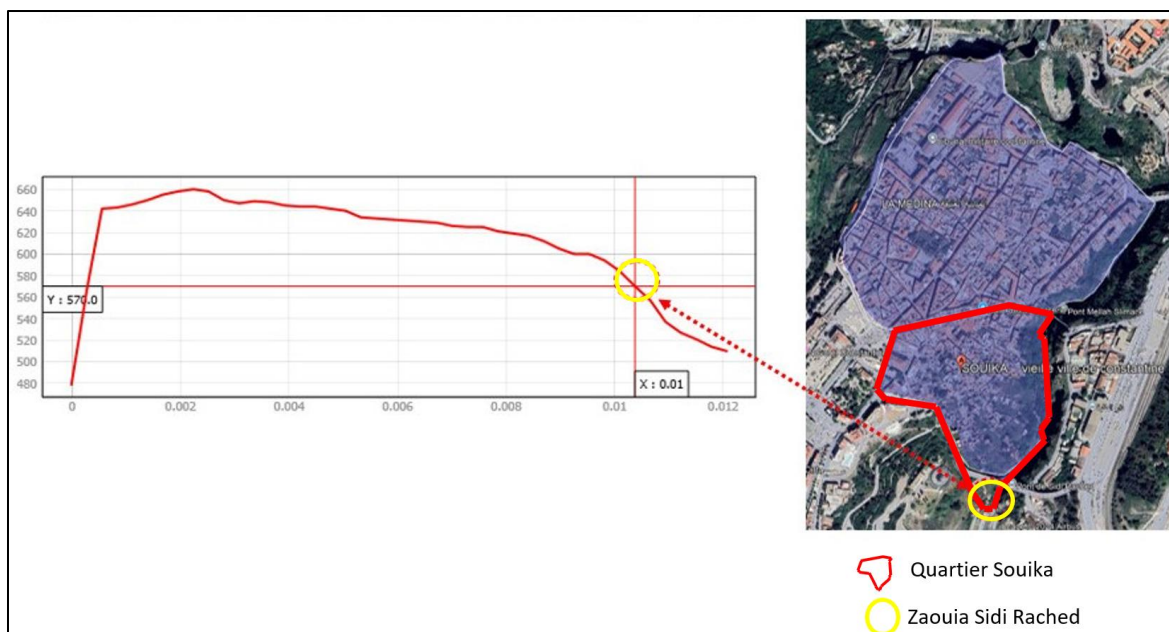


Figure 50: Coupe topographique localisant la Zaouïa sur le rocher historique de Constantine —réalisée avec QGIS.

Source : Haouacha et al. 2025

Notre choix s’est porté sur cet édifice pour plusieurs raisons. Tout d’abord, la forte stratification visible sur ses différentes façades, combinée à la diversité des formes stylistiques, décoratives et structurelles qui, attire immédiatement l’attention. De plus, sa localisation dans une zone emblématique — à l’intersection des principaux flancs permettant historiquement d’atteindre cette ville imprenable — l’a placée au centre des assauts et offensives successifs dirigés contre Constantine. Cette situation lui confère une histoire constructive particulièrement riche et tumultueuse, lisible aujourd’hui encore sur sa surface.

Par ailleurs, bien qu’elle occupe une position dominante dans le panorama urbain de la cité pluriséculaire, et que son existence soit attestée dès l’époque ottomane(L. Féraud 1868), la Zaouïa demeure très peu documentée. Elle est restée en marge des recherches historiques, architecturales et archéologiques consacrées à Constantine depuis la seconde moitié du XIX^e siècle.

Enfin, sa subsistance dans un secteur historique presque entièrement détruit renforce son intérêt culturel et économique. Malgré une première démolition partielle de son site d’implantation au début du XX^e siècle, lors du dégagement du terrain destiné à la construction des piles du pont Sidi Rached, puis la destruction massive qu’a subie la majeure partie du quartier Souika ces

dernières décennies, l'édifice constitue aujourd'hui l'un des rares témoins subsistant de ce tissu ancien au cachet architectural parmi les plus anciens de Constantine. Ce constat justifie pleinement la nécessité d'un approfondissement de sa documentation.

4.1.2. Description du bâtiment :

La pluralité des affectations attribuées à cet édifice dans la littérature — mosquée Sidi Rached, mausolée Sidi Rached ou encore zaouïa Sidi Rached — reflète l'incertitude quant à sa fonction originelle. Cette diversité de dénominations peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, son échelle, sa situation en périphérie de la ville et puis une architecture puisée dans les formes du bâti domestique de la cité suggèrent qu'il a pu servir initialement d'espace de retraite spirituelle, d'où sa qualification de Zaouia. Par ailleurs, la présence d'une salle de prière — probablement fréquentée autrefois par les fidèles, et par le voisinage — justifie son identification comme mosquée dans les écrits. À cela s'ajoute l'existence de trois tombes dans la cour, et un tombeau à l'intérieur hypothétiquement attribué au pieu fondateur, qui explique son assimilation fréquente à un mausolée. Cependant, ces fonctions multiples — religieuse, spirituelle et mémorielle — déterminent la définition même d'une Zaouïa¹⁹.

Concernant la datation de l'édifice, plusieurs hypothèses ont été avancées. L'historien M. El Eulmi rapporte (Djebballi 2023) qu'al-Waqidi aurait mentionné l'édifice à Constantine correspondant à l'actuelle zaouïa lors de la conquête d'al-Ifriqiya menée par 'rs d Ibn Nafi' dans la seconde moitié du VII^e siècle, précisant qu'il s'agissait alors, d'une église chrétienne réutilisée pour la prière du Vendredi. De la même source, on apprend qu'Ibn al-Qunfudh al-Qusantini (Ibn Qunfudh al-Qusantīnī 1968) a décrit cette même mosquée, désignée sous le nom de « Sidi Rached », à l'époque hafside en 1182. Toutefois, deux repères permettent de mieux circonscrire sa période d'existence : d'une part, l'implantation des confréries soufies au Maghreb à partir du XII^e siècle — les zaouïas étant également appelées dans la région dâr al-duyûf (Bestandji 2009) — et d'autre part, la plus ancienne mention de source fiable de l'édifice sous l'appellation de mosquée Sidi Rached, dans l'inventaire établi sur ordre de Salah Bey en 1776 (L. Féraud 1868). Ces éléments permettent de situer l'origine de l'édifice, en tant que lieu religieux et spirituel, entre le XII^e et le XVIII^e siècle.

Sur le plan architectural et spatial, la zaouïa Sidi Rached reprend les composantes caractéristiques des établissements confrériques du monde musulman. Son organisation

¹⁹ Siham Bestandji, « Rites thérapeutiques et bien être spirituel . Ancrages et résurgences. Pour un projet urbain de tourisme pèlerin. » (Doctorat Urbanisme, Université Mentouri Constantine, 2009), <http://depot.umc.edu.dz/handle/123456789/7484>.

s'articule autour d'une cour centrale distribuant les différents espaces. Elle comprend une salle de prière avec mihrab, ainsi qu'un espace destiné à l'enseignement coranique ou à l'isolement spirituel. La cour abrite également des aménagements hydrauliques — un puits et une fontaine — ainsi que trois tombes, dont l'affiliation exacte demeure incertaine. Plusieurs cellules sont réservées à l'hébergement des étudiants et/ou des voyageurs de passage, auxquelles s'ajoutent une petite cuisine et des sanitaires attenants. Deux jardins complètent l'ensemble : le premier, attenant au minaret et le second, plus récent, formant une sorte de balcon urbain ouvert sur le côté du quartier Bardo (figure.51).

Enfin, le minaret vient souligner la vocation religieuse de l'édifice tout en jouant un rôle de repère visuel et culturel. La (figure 52) illustre l'organisation des espaces et leur fonctionnement, tandis que la (figure 53) présente des planches du dossier graphique de la Zaouia détenu par le gardien actuel des lieux.

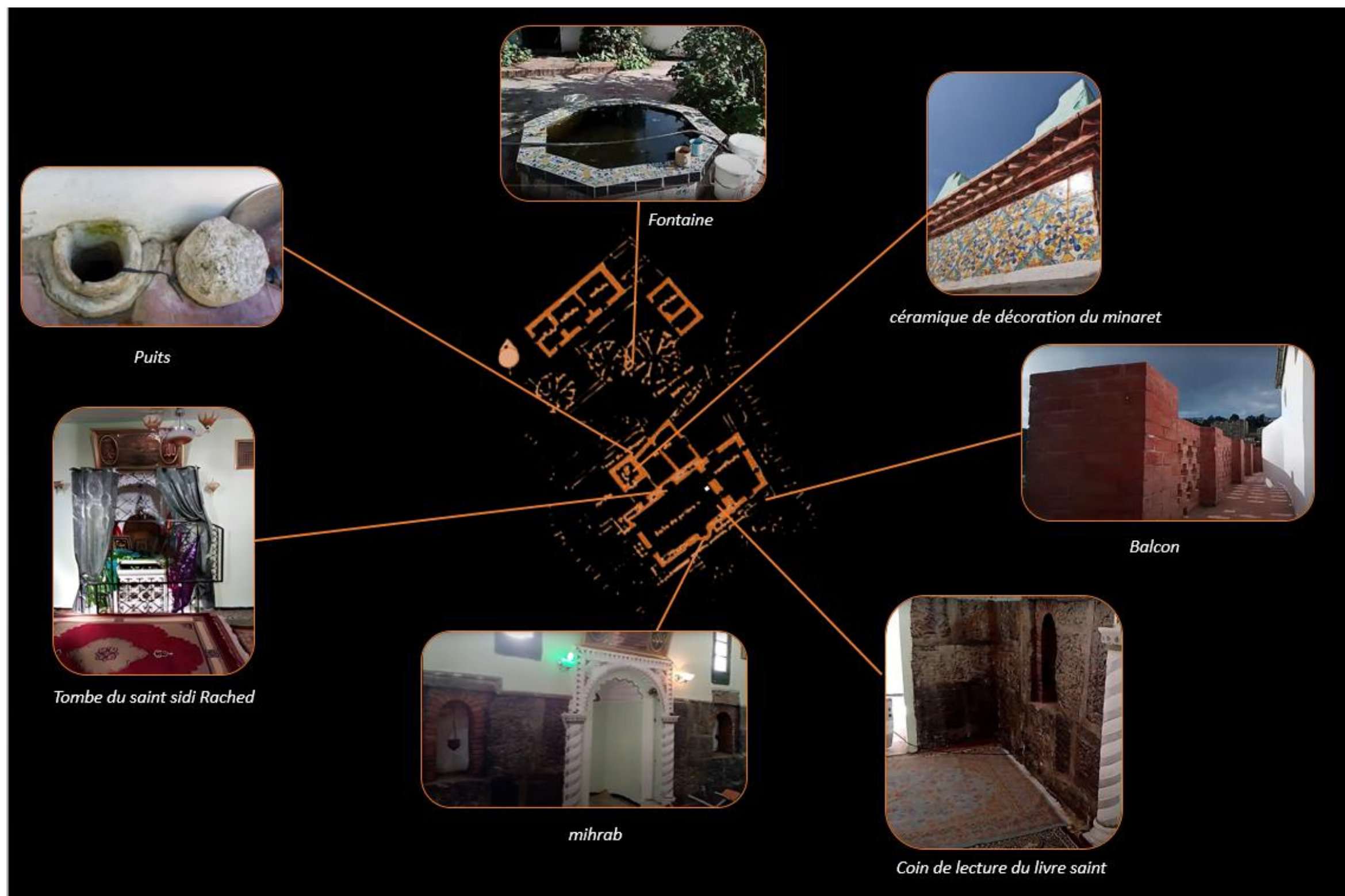


Figure 51: Espaces intérieurs et détails architectoniques et décoratifs de la zaouïa.

Source : auteure.



Figure 52: Organisation des espaces de la Zaouia Sidi Rached. a : plan d'ensemble de la Zaouia Sidi Rached, b : distribution spatio-fonctionnelle

Source : a. Haddad.2015, b. B. Pagand. 1988

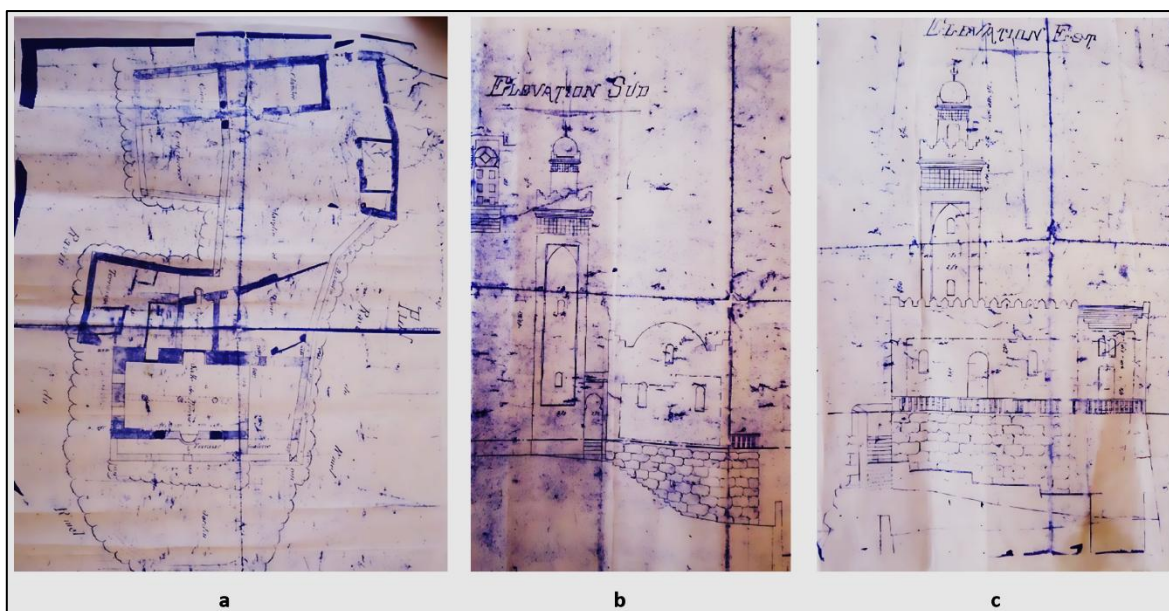


Figure 53: Ancien dossier Graphique de la Zaouia Sidi Rached. a : plan, b : élévation Sud, c : élévation Est

Source : archives retrouvées sur Place —Zaouia Sidi Rached— de source inconnue

4.2. Application de la méthode proposée à l'étude stratigraphique de la Zaouïa Sidi Rached

4.2.1. Mise en œuvre de la méthode :

Comme indiqué dans le chapitre précédent (voir supra, chapitre 3, §3.2), le principal support de représentation, d'analyse et de visualisation des données est un modèle 3D issu de la réalité. Ce modèle sert d'outil à notre démarche : il permet l'identification et la cartographie des différents sous-ensembles stratigraphiques, mais aussi l'intégration et le recoupement des informations. Il sert également pour la visualisation et l'interprétation de l'ordre stratigraphique et de la genèse morphologique de la zaouïa Sidi Rached.

Cependant, l'édifice ayant fait l'objet de nombreuses rénovations recouvrant une grande partie de la stratification de ses parois intérieures, et son usage actuel accentuant encore ce recouvrement par divers aménagements, nous avons choisi de concentrer notre étude sur les façades extérieures. Ce choix s'inscrit pleinement dans nos objectifs, à savoir expérimenter et valider la méthode proposée.

4.2.1.1. Acquisition des données stratigraphiques :

Les principales données permettant de caractériser la stratification d'un édifice sont d'ordre spatial, morphologique et chronologique.

En ce qui concerne les données spatiales et morphologiques, nous avons réalisé un relevé 3D de l'édifice à l'aide de la technique de photogrammétrie. Au vu de la topographie très accidentée du site, combinée à la position du bâtiment en bordure de ravin, l'utilisation d'un scanner laser terrestre était difficile. Par ailleurs, les restrictions administratives relatives à l'usage de drones constituaient un obstacle majeur au recours à une capture aérienne, pourtant particulièrement adaptée dans ce type de contexte. Face à ces contraintes, la photogrammétrie terrestre s'est imposée comme méthode la plus appropriée pour l'acquisition des données spatiales et morphologiques.

La configuration singulière du bâtiment, implanté de façon isolée à la pointe du rocher, offrait de surcroît des conditions favorables : un dégagement visuel important, la possibilité de prises de vues depuis la rive opposée, ainsi qu'un point de surplomb privilégié depuis le Pont Sidi Rached. Ces atouts ont permis d'assurer une couverture complète de l'ensemble des façades extérieures.

Notre relevé a été réalisé à partir d'un jeu de données constitué de 320 photographies (5184 × 3456 pixels), présentant un fort chevauchement — de l'ordre de 80% de recouvrement — entre chaque paire d'images successives. Les prises de vue ont été effectuées depuis plusieurs points stratégiques : le parc urbain du Bardot —a partie haute et en amont du viaduc Salah Bey— la rive Est du ravin, la rue de Roumanie, ainsi que le Pont Sidi Rached (figure 54). La capture a été réalisée en une seule journée, sous un ciel couvert, afin de garantir un éclairage diffus et d'éviter la formation d'ombres portées sur les surfaces, susceptibles de compromettre le calcul et la détection des points homologues lors de la reconstruction 3D.

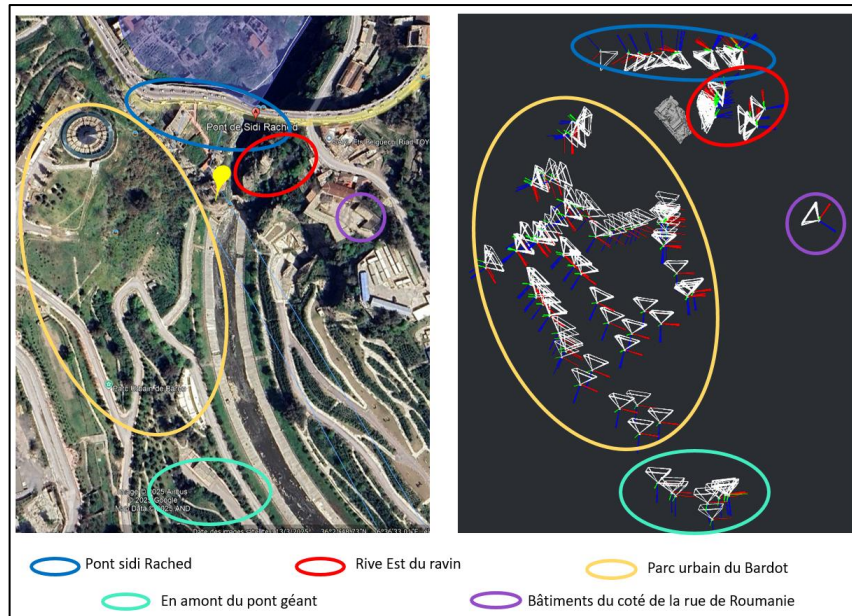


Figure 54: Positions de prises des photographies pour la reconstruction du modèle 3D. à gauche : photo aérienne du site (Google Eearth pro), à droite : calcule des positions des cameras (Meshroom)

Source : auteure.

La reconstruction photogrammétrique s’est déroulée en deux étapes. Dans un premier temps, nous avons généré un nuage de points dense à l’aide de l’outil Colmap(Schönberger, s. d.). Cette étape a permis d’obtenir une reconstitution globale de la géométrie de l’édifice et de son environnement immédiat, ainsi que la reproduction de la texture des matériaux. Toutefois, des zones lisses, homogènes et peu texturées — comme les parois enduites de revêtement blanc et le minaret — ont conduit à des lacunes volumétriques, visibles sous forme de vides dans la maquette numérique.

Pour pallier ces manques, nous avons construit un maillage à partir des mêmes données, en utilisant l’approche VPL —graphe nodal— du logiciel Meshroom développé par AliceVision(Griwodz et al. 2021). Ce pipeline visuel a l’avantage d’offrir une personnalisation intuitive du processus, y compris pour les utilisateurs novices dans la manipulation des algorithmes et des techniques de reconstruction 3D, tout en laissant la possibilité de choisir et d’affiner les paramètres de chaque étape de calcul.

Après la génération d'un nuage de points épars via un procédé SFM —Structure From Motion— diverses techniques ont permis de combler les surfaces manquantes. Lors de la phase de densification du nuage de points, les régions clairsemées ont été interprétées comme des zones ayant une carte de profondeur —Depth-map— homogène et puis regroupées par interpolation avec les points voisins afin de créer des surfaces continues.

Ensuite, pour la génération du maillage, l'algorithme de triangulation de 'Delaunay' a relié les points en minimisant les angles aigus. Ce maillage a ensuite été affiné par l'algorithme de reconstruction de surface de 'Poisson', qui a permis la création d'une enveloppe homogène et continue des cavités en insérant une iso-surface calculée à partir des données adjacentes (figure.55).

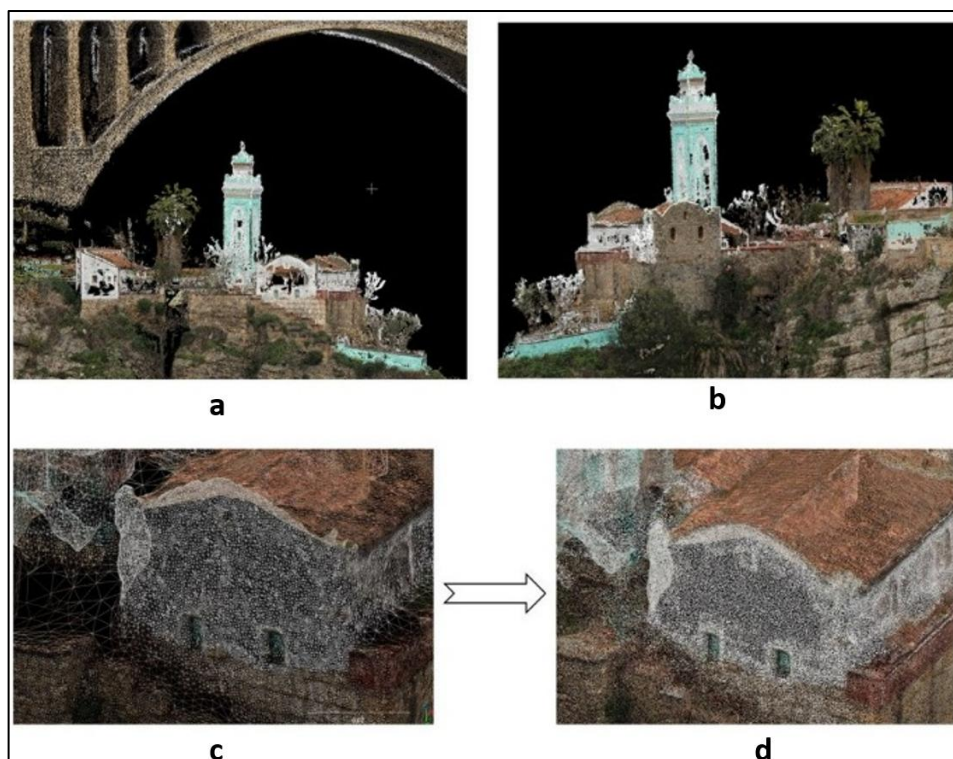


Figure 55: a, b Nuage de points généré par Colmap. a : vue Sud-Ouest. b : vue Sud-Est. c : interpolation des lacunes par un maillage, d : conversion en nuage de points dense

Source : Haouacha et al.2025

Enfin, le maillage obtenu a été exporté au format .ply, puis reconverti en nuage de points dense grâce à la fonction ‘sample points on a mesh’ du logiciel CloudCompare. Ce second nuage a été fusionné avec le modèle initial généré sous Colmap, afin d’optimiser la restitution et de garantir un maximum d’informations géométriques. Le résultat de la reconstruction du modèle 3D identique à la réalité est illustré dans la (figure.56), et le pipeline personnalisé utilisé pour la reconstruction est inséré dans [annexe. E]



Figure 56: Les modèles 3D générés. a : nuage de point dense, b : maillage

Source : auteure.

4.2.1.2. Identification et représentation des entités stratigraphiques

L'objectif principal d'une étude stratigraphique est d'identifier les différentes unités stratigraphiques qui composent un bâtiment multicouche. Cet objectif est généralement atteint par la détection d'interfaces —marquant des discontinuités dans les matériaux, les formes, les techniques de construction et les caractéristiques stylistiques ou structurelles— afin de délimiter des zones homogènes représentant les unités stratigraphiques.

Ce processus est traditionnellement exécuté à travers une inspection visuelle de la totalité des surfaces du bâti, et une projection manuelle des résultats. Ce processus minutieux et chronophage s'appuie largement sur l'expertise et les capacités d'observation des praticiens, souvent dans des délais assez limités.

Dans ce travail, nous avons eu recours à deux méthodes d'identification semi-automatiques des unités stratigraphiques bâties et de leurs interfaces.

i. Segmentation et classification supervisée via machine-learning des unités stratigraphiques du bâti :

Pour l'identification des zones homogènes représentant les unités stratigraphiques du bâti, nous avons mis en œuvre une segmentation et une classification fondées sur la texture, selon un procédé d'apprentissage automatique proposé par Grilli et al (E. Grilli et al. 2018). Cette approche vise à regrouper des régions présentant un degré élevé d'homogénéité visuelle, selon les étapes suivantes :

- *Création d'une carte UV à partir du modèle 3D* : Dans un premier temps, la géométrie du maillage 3D construit par triangulation a été simplifiée en un maillage quadrangulaire, afin de faciliter le dépliage du modèle sous forme d'ortho-image bidimensionnelle. Une fois la géométrie simplifiée, nous avons procédé à la définition des arêtes de découpe des différentes surfaces du volume, ce qui a permis d'obtenir un développé du bâtiment et de générer une représentation plane — une ortho-image — appelée « UV map », ou patron du volume.

- *Segmentation et classification supervisée des matériaux de construction* : La carte UV générée a servi d'image source pour la segmentation et la classification par apprentissage automatique. Sur cette ortho-image, nous avons défini des classes par annotation directe

d'échantillons, constituant les données d'apprentissage — Ground truth. Ces classes correspondent aux différents matériaux de construction, identifiés par inspection visuelle des surfaces. Le modèle a ensuite été entraîné sur la base de ces échantillons, à partir de l'extraction de descripteurs pour chaque donnée annotée, ce qui a permis d'élaborer un 'classifieur'. Une fois le modèle d'apprentissage automatique entraîné, ce dernier a été appliqué à l'ensemble de la carte UV et a permis de produire en sortie une image segmentée. Il convient de préciser que l'obtention du résultat final a nécessité plusieurs itérations d'entraînement, assorties de vérifications et de corrections, afin d'optimiser les performances du modèle.

- *Rétroprojection des régions homogènes comme annotation du maillage 3D* : Dans cette étape, l'image segmentée, organisée en calques correspondant aux différentes classes, a été utilisée comme texture pour être re-projetée sur le maillage initial. Chaque sommet du maillage 3D étant associé à des coordonnées (u, v) renvoyant à un pixel de l'UV map, les classes codées par calques de couleurs ont pu être appliquées comme texture diffuse sur le maillage 3D. Ce processus a permis d'obtenir un modèle 3D enrichi, segmenté selon les unités stratigraphiques bâties. La (figure. 57) illustre la totalité du processus de segmentation/ classification. L'[annexe. F] présente de manière détaillée le processus de segmentation et de classification, étape par étape, ainsi que les différents outils et algorithmes utilisés.

Outre la délimitation des différentes régions homogènes correspondant aux unités stratigraphiques du bâti, cette méthode de classification fondée sur la texture a permis de mettre en évidence la présence ponctuelle de matériaux de maçonnerie issus d'une région déterminée "classe A", au sein d'une région homogène distincte, identifiée comme "classe B" tel qu'indiqué dans la (figure 58). Cette observation suggère que des matériaux de la "classe A" ont été récupérés et réemployés lors des phases ultérieures de réparation ou de reconstruction de la "classe B". Une analyse plus approfondie de cette dernière a confirmé une réutilisation manifeste de matériaux de la "classe A", intégrés selon une technique de mise en œuvre différente

i. Détection des zones de transformation :

Pour détecter les zones de transformation au sein des surfaces en maçonnerie du bâtiment, une attention particulière a été portée aux changements brusques dans la direction des joints, ainsi qu'aux variations d'espacement et d'alignement des assises de pierres, signes révélateurs d'interventions postérieures à la phase initiale de construction.

Afin d'analyser plus finement les interfaces du bâtiment et de localiser ces transformations, une segmentation pierre par pierre a été réalisée à l'aide du plugin CC masonry de CloudCompare, développé par (Forster et al.)(Forster et al. 2023). Comme indiqué précédemment (voir supra, chapitre 3, § 3.2.1.2), ce module s'appuie sur la transformée en ondelettes continues 2D pour détecter le mortier entourant les blocs, en examinant la profondeur des joints. Cette opération permet d'isoler le mortier et de faire ressortir distinctement les contours des blocs de maçonnerie.

Conçu initialement pour l'étude des caractéristiques des pierres en maçonnerie — classification et dispositions selon les formes et les dimensions — l'outil a été appliqué ici dans une perspective différente. L'inspection de forme du mortier isolé a permis de mettre en évidence les zones d'altérations et de transformations, identifiables grâce aux irrégularités de pose et de jointoiement. En effet, les ruptures nettes et incohérentes, les vides, et le changement dans l'espacement ou l'alignement des rangées de pierres témoignent d'une transformation ultérieure à la construction d'origine. La zone illustrée dans la (figure 59) montre clairement une perturbation dans la mise en œuvre des pierres à l'extrémité de la façade sud-est, correspondant à l'effondrement d'une partie de l'ancien édifice, survenu avant l'extension réalisée durant la période coloniale française.

L'utilisation de l'outil — conçu initialement pour le traitement des nuages de points à haute précision acquis par scanner laser — a révélé certaines difficultés liées à l'exploitation de nuages de points issus de la photogrammétrie ainsi qu'à l'état de conservation de l'édifice. Ces difficultés résultent, d'une part, de l'hétérogénéité du niveau de précision et de densité dans les différentes zones du nuage de points, et d'autre part, de l'irrégularité des épaisseurs des joints.

Pour pallier au manque de précision et d'homogénéité du modèle photogrammétrique, le recours au mode de segmentation manuelle intégré dans le module *CC masonry* s'est avéré nécessaire, afin d'ajuster et de compléter les résultats générés automatiquement. Cette intervention manuelle a permis de compenser les insuffisances dans la détection des joints de mortier sur le modèle photogrammétrique. L' [annexe. G] illustre le processus de segmentation réalisé à l'aide du plugin *CC masonry toolkit*.

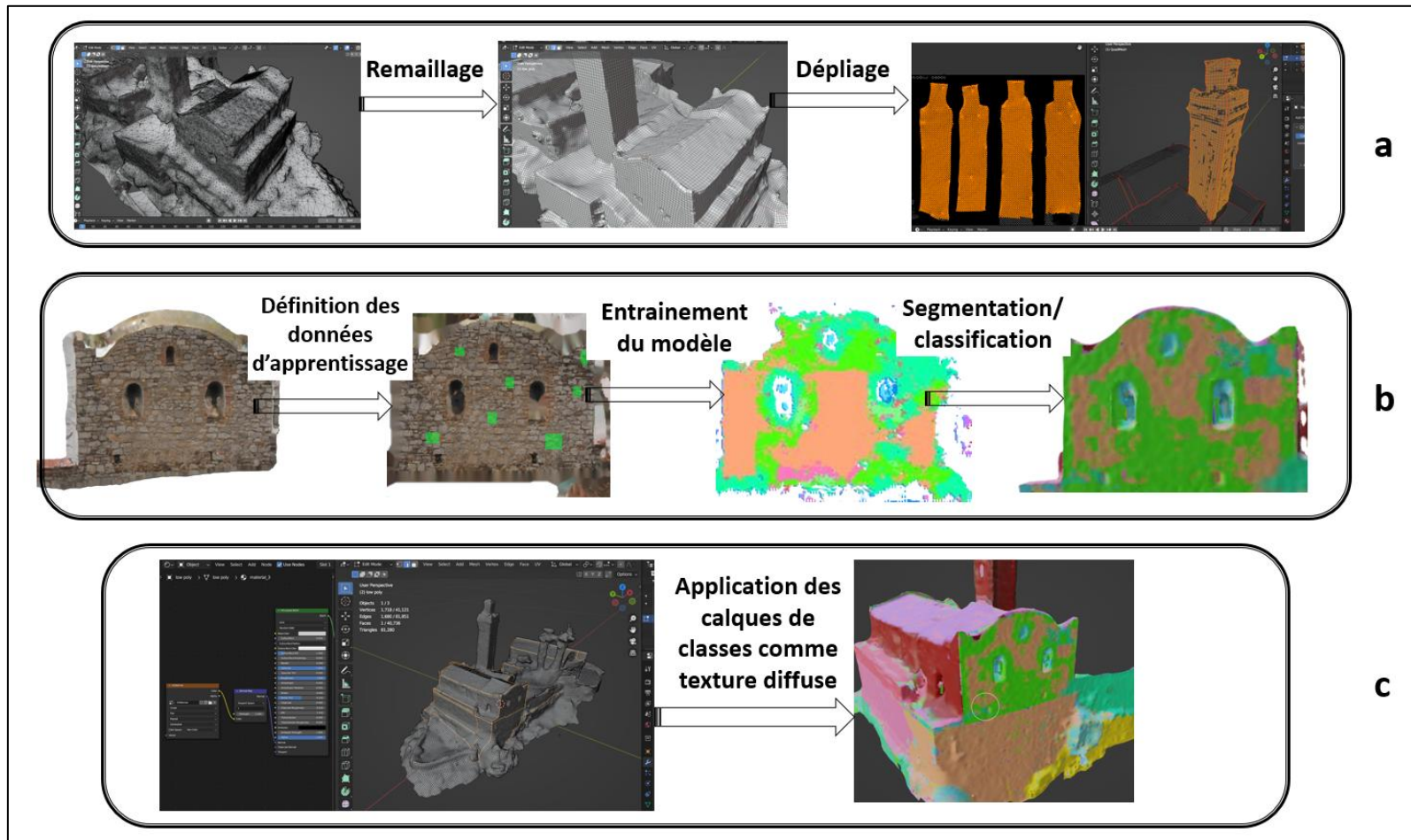


Figure 57: Flux du processus de segmentation/classification via machine learning pour la définition des SBUs. a : simplification de la géométrie et dépliage, b : segmentation/ classification supervisée, c : cartographie des calques de classes

Source : auteure.



Figure 58: Cartographie de la distribution des matériaux dans les unités stratigraphiques du bâti

Source : F. Haouacha et al. 2025.

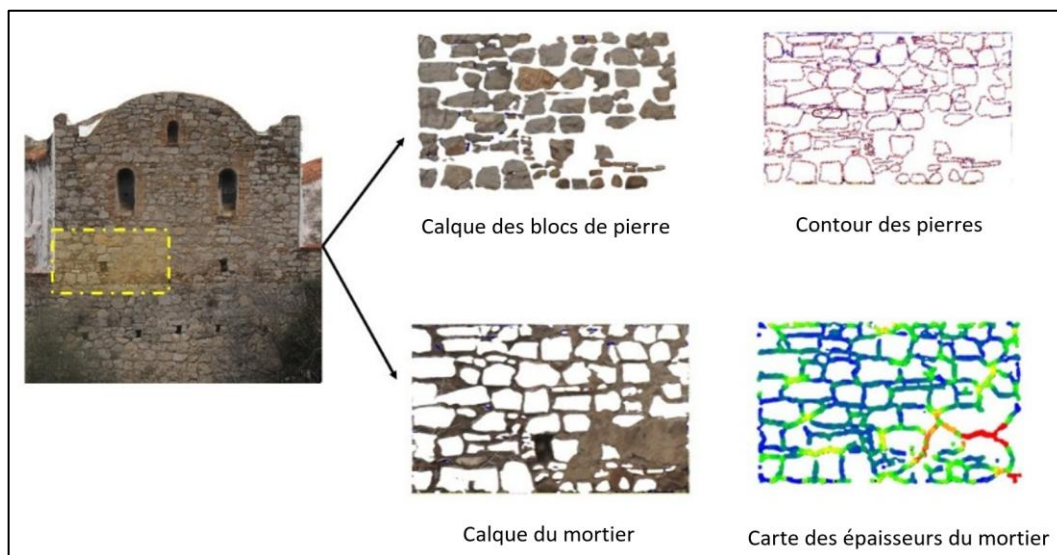


Figure 59: Repérage des zones de transformation à partir de l'inspection des joints de mortier

Source : HAOUACHA et al. 2025

ii. Identification des unités chronologiques :

Une fois les différentes unités matérielles de la stratification définies, il convient de les organiser chronologiquement afin de saisir la genèse morphologique du bâtiment et d'en déduire les interactions réciproques entre unités stratigraphiques.

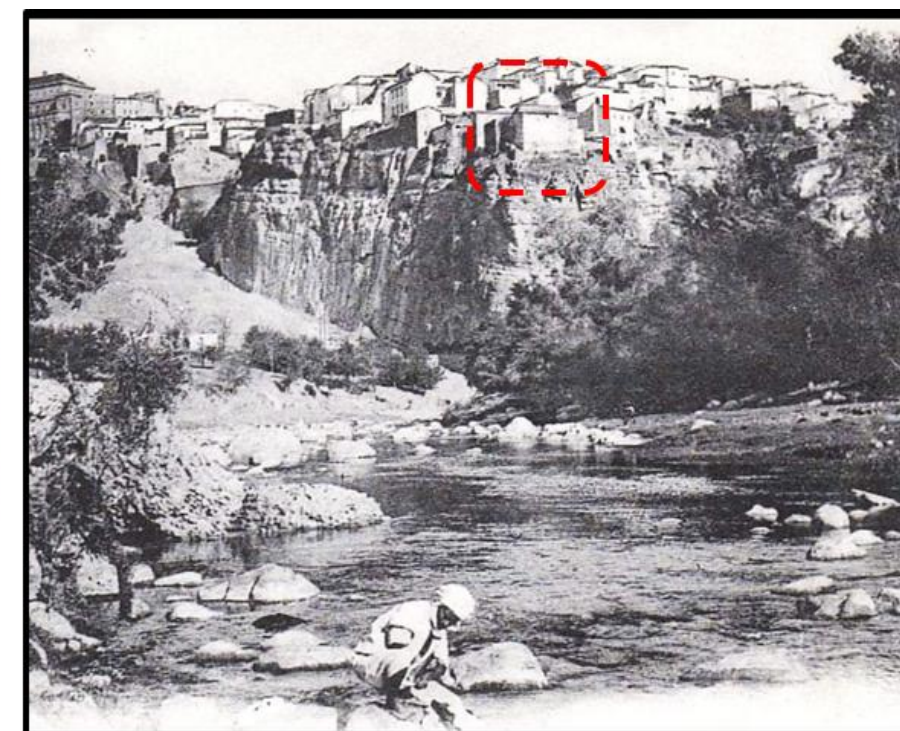
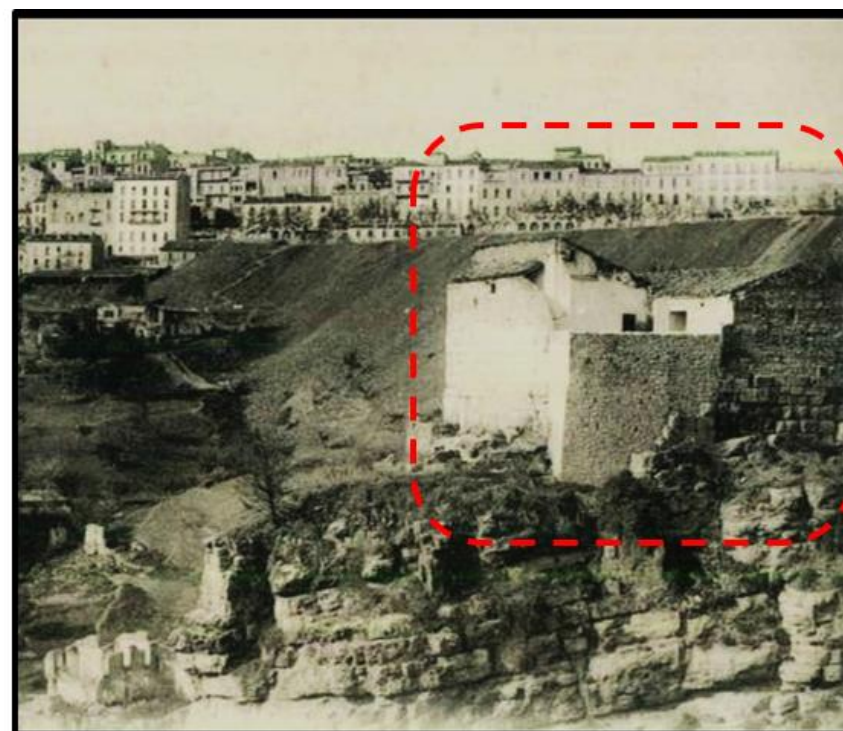
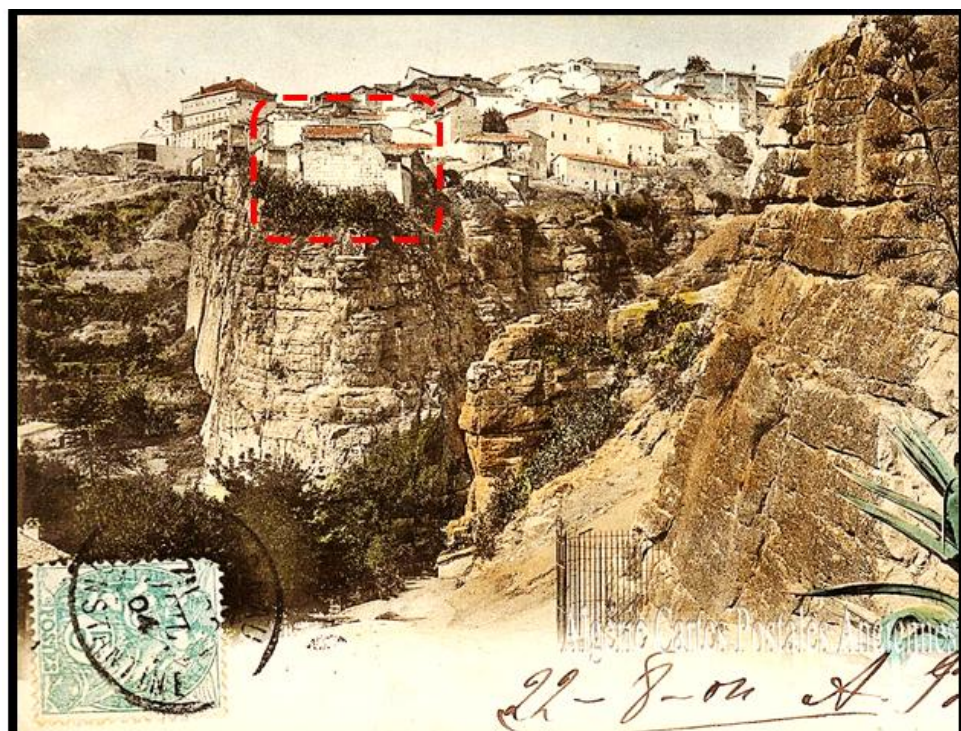
L'identification des phases, époques ou activités auxquelles appartiennent ces unités s'est appuyée sur une analyse documentaire approfondie, portant sur les dimensions historiques, culturelles, artistiques et typologique de la cité et de son évolution.

Une première recherche iconographique a été réalisée, en raison de la grande fiabilité des photographies pour restituer l'état passé des lieux. La période coloniale française, marquée par l'essor de la photographie comme outil d'immortalisation des sites et des événements, a livré plusieurs clichés couvrant le site et le bâtiment étudié dès la fin du XIX^e siècle. Ces documents se sont révélés précieux pour éclairer l'évolution morphologique de la Zaouia Sidi Rached.

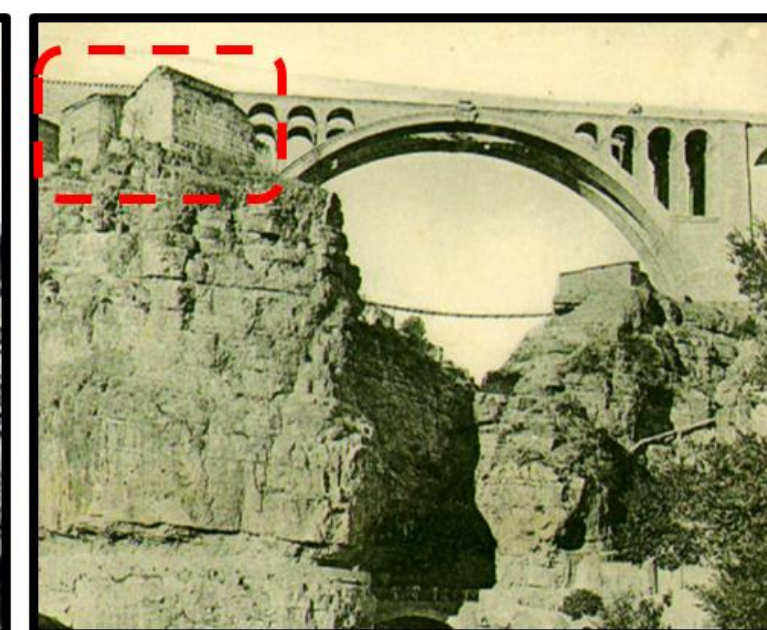
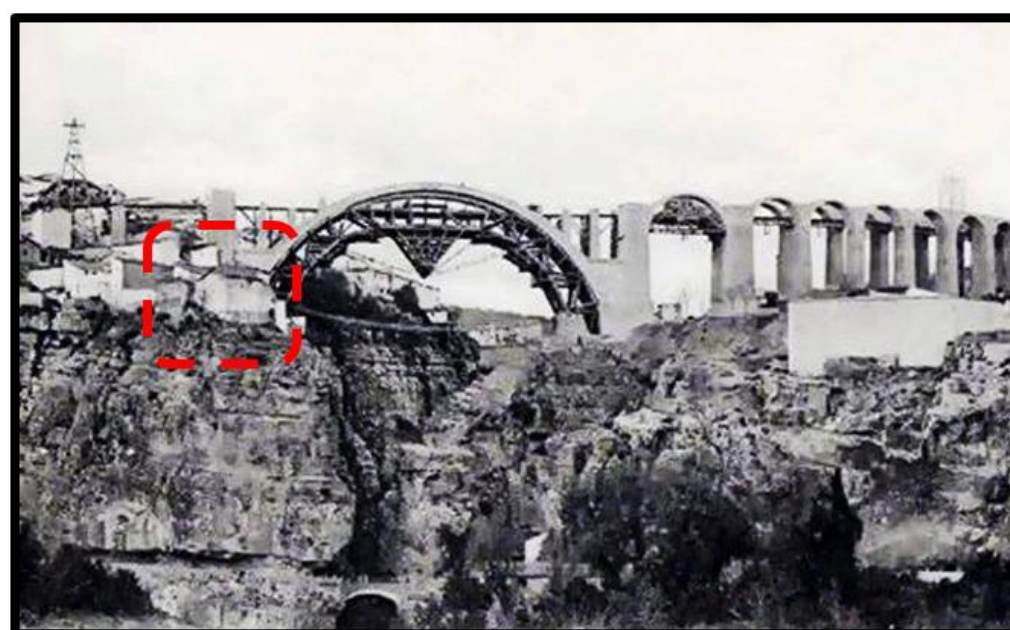
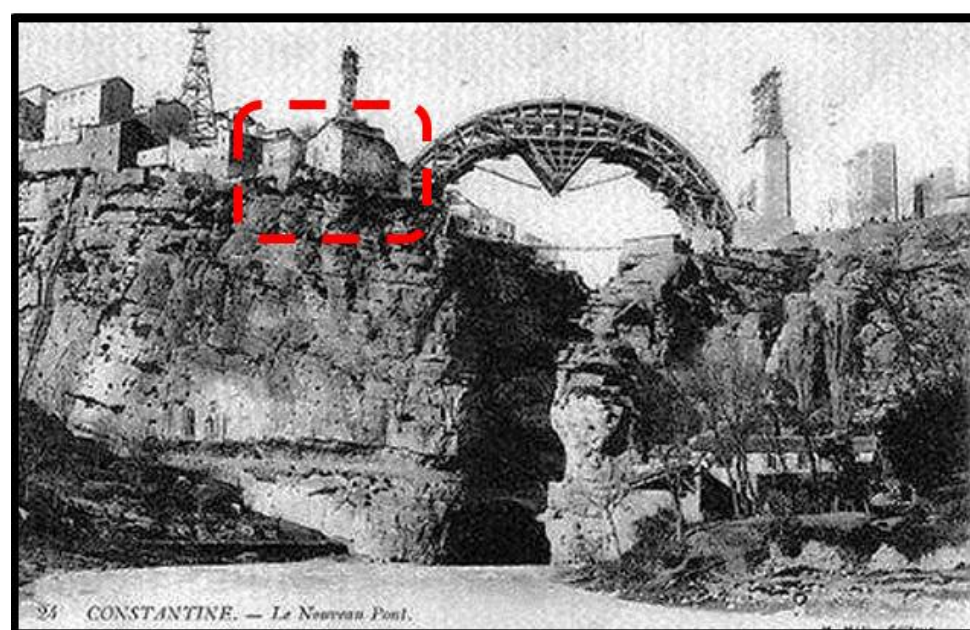
L'examen de diverses images représentant le rocher historique à l'entrée Sud du ravin a permis de retracer une étape majeure de la transformation de l'édifice, d'en préciser la datation approximative et d'en identifier la cause. La (figure 60) illustre successivement : l'état de la Zaouia avant la construction du pont Sidi Rached [avant 1908] (fig. 60.a), pendant les travaux du pont [1908–1912] (fig. 60.b), et après son inauguration [après 1912] (fig. 60.c).

Cette analyse met en évidence le lien de causalité entre l'édification du pont et la transformation de la Zaouia. Une recherche archivistique complémentaire, menée à partir de la documentation relative à la ville durant les années de construction du pont, a permis de confirmer cette hypothèse [voir annexe. H]. Dans le quarante et unième volume de la Revue Savante de la Société Archéologique de Constantine parut en 1907, M. Auguste Vel rapporte la découverte de vestiges antiques lors des travaux de destruction du quartier Sidi Rached, destinés à libérer le terrain pour l'emplacement des piles du futur pont (Société archéologique de Constantine 1907). Cet élément pourrait expliquer l'écart de la densité du bâti observé dans cette partie du site, illustré dans les ensembles d'images 'a' et 'b' de la (figure. 60).

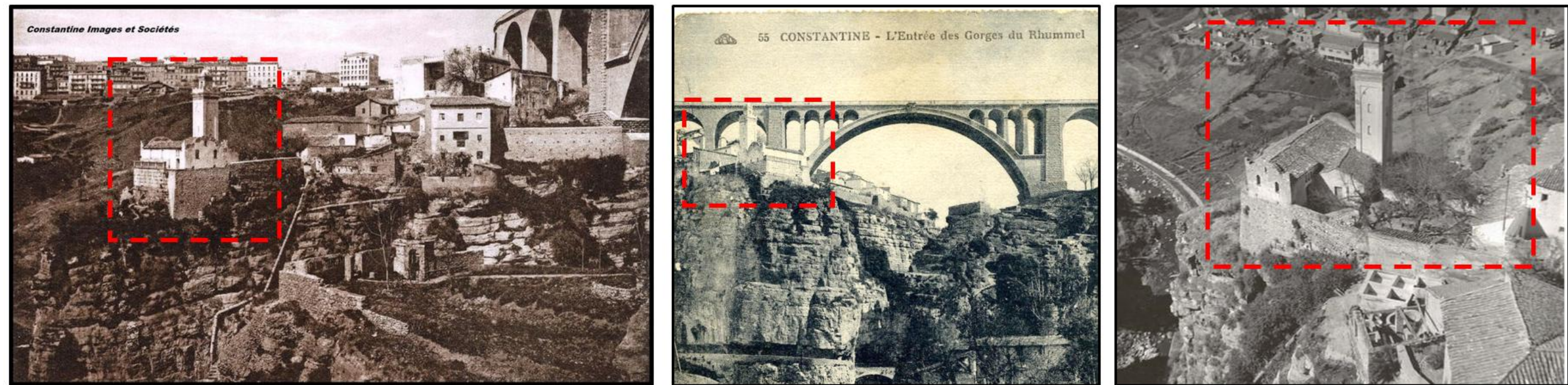
Par ailleurs, un article paru en 1915 dans le journal « La Dépêche de Constantine » reprend un rapport de la commission des travaux relatifs aux rues du quartier arabe sous le pont Sidi-Rached (Cuttoli 1915). Le rapport signale l'état de dégradation avancée du quartier, consécutif à la construction du pont et souligne l'urgence d'entreprendre des travaux de rénovation. Il précise également la décision du maire de la ville de procéder à l'embellissement et à la réhabilitation de la mosquée, incluant la création d'un minaret à la fois fonctionnel et esthétique. Ce contexte pourrait expliquer le recours à la forme arquée des murs pignons — bien que la couverture ne soit pas voûtée mais à double pentes — vraisemblablement en référence aux arcs du nouveau pont.



a



b



c

Figure 60: La Zaouia Sidi Rached à l'époque coloniale Française : a- l'édifice avant 1907, b- l'édifice entre 1907 et 1912, c- l'édifice après 1915

Source : cartes postales ancienne, début XX^e siècle, origine non identifiée

Cette étude a ainsi permis de définir une première unité chronologique [Chu_I], illustrée dans la (figure. 61), regroupant les unités stratigraphiques construite pendant la période allant approximativement de 1915 jusqu'à la rénovation des lieux au début des années 2000. Cette dernière activité est marquée notamment par l'ajout du balcon urbain à la pointe du rocher et par la construction de la coursive sur le flanc Ouest.

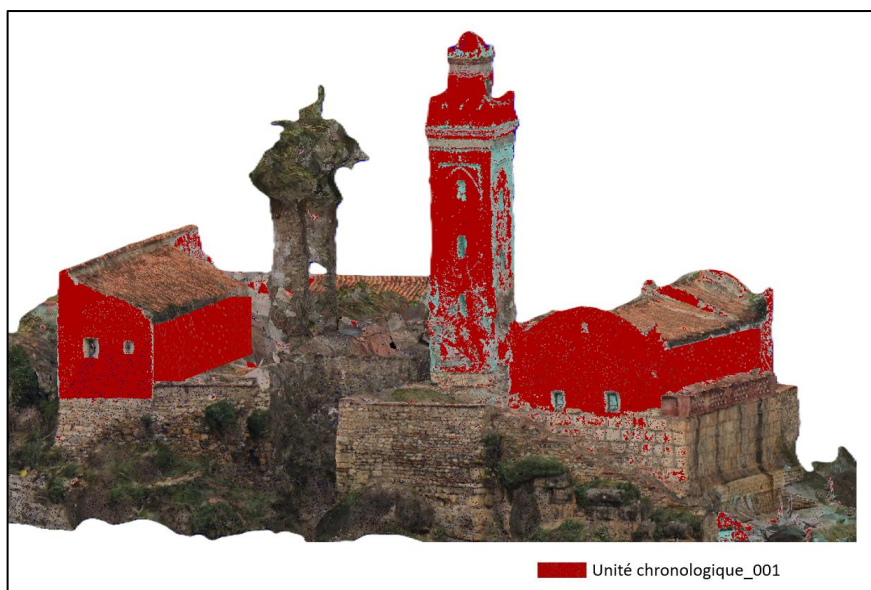


Figure 61: Projection de l'unité chronologique [ChU_I] (intervention coloniale postérieure à 1915) sur le nuage de points — segmentation selon la valeur du champ scalaire

Source : auteure.

D'autre part, la segmentation du nuage de points, réalisée pour la reconnaissance et l'agrégation des unités stratigraphiques du bâti présentant les mêmes caractéristiques, a permis de mettre en évidence une seconde unité chronologique [ChU_II] composée de fragments de murs en pierre de taille de typologie romaine situés en bordure du rocher. Le croisement entre une analyse historique et une analyse typologique —comparé aux vestiges romains identifiés à l'extérieur et l'intérieur de la ville intramuros— nous a conduits à les rattacher à l'ancienne muraille de la cité antique romaine (figure.62).

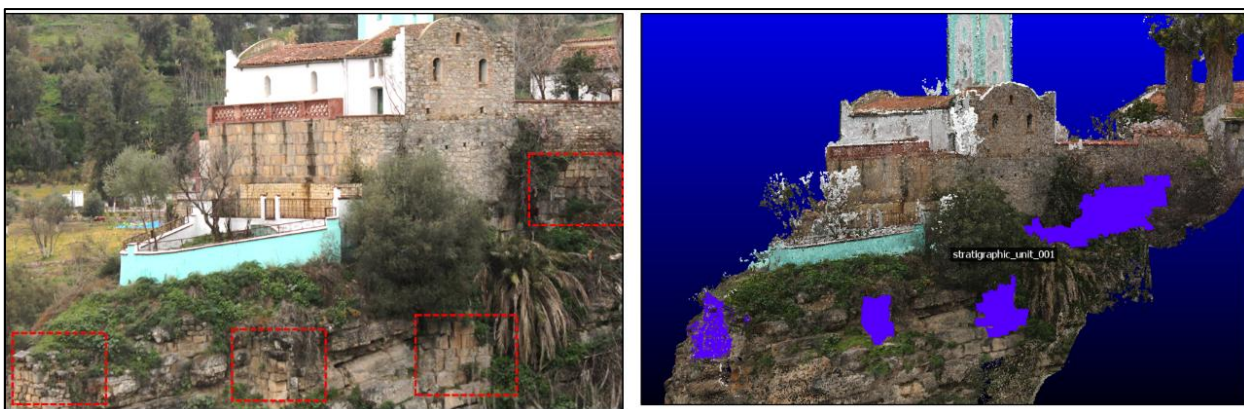


Figure 62: l'unité Chronologique [ChU_II] correspondant à l'ancien Rampart de la cité romaine.

Source : auteure.

Pour recouper et vérifier cette hypothèse, une recherche documentaire historique et archivistique a été menée en parallèle. Dans son ouvrage connu sous le nom de *Tabula Rogeriana*, rédigé au XIII^e siècle (Idrīsī 1250), al-Idrissi décrit la ville de Constantine à l'époque musulmane et mentionne explicitement l'existence d'une muraille de typologie Romaine, remarquable par sa faible hauteur sur la quasi-totalité du périmètre, à l'exception du côté de l'isthme occidental correspondant à la place de la Brèche actuellement place des martyrs à l'avenue Ben Boulaid.

Lors de son passage à Constantine, entre 1511 et 1519, Léon l'Africain souligne également, les origines romaines de la ville (al-Hasan ibn Muhammad al-Wazzan al-Fassi 1896), en évoquant ses épaisses murailles de pierre de taille, noircies et, dont certains fragments sont encore visibles aujourd'hui, notamment sur le flanc Sud-Ouest, et au mur du Mihrab à l'intérieur de la Zaouia (figure. 63).



Figure 63: Identification des fragments du rempart décrit par Léon l'africain

Source : Auteure.

Par ailleurs, la description que Mercier fait du rempart antique de la ville (Mercier 1903), nous a permis de confirmer l'appartenance de ces fragments à la structure défensive. Il y mentionne, en effet, l'adossement de certaines portions de la muraille de la ville au rocher, ce que nous avons pu retracer dans les fragments relevés dans la figure précédente (Supra. Figure. 62).

La description fournie par Thomas Shaw confirme l'extension de la muraille jusqu'à la pointe de Sidi Rached, puis sa continuité le long du ravin (Shaw 1738). Une analyse typologique approfondie, menée autour des limites du rocher historique, a permis d'identifier plusieurs vestiges rattachés à ce mur. Ces derniers ont été mis en correspondance, par analogie, avec les fragments repérés dans les unités stratigraphiques issues de la segmentation, ce qui a permis de renforcer l'hypothèse de leur appartenance au rempart antique qui entourait la cité romaine. La (figure. 64) met en évidence le travail typologique et historique réalisé pour en préciser l'identification et l'appartenance chronologique.

Enfin, une dernière unité chronologique [ChU_III] a pu être définie, couvrant la période comprise entre le XIII^e et le XVIII^e siècle. Elle regroupe les unités stratigraphiques bâties

qui ne relèvent pas des deux ensembles chronologiques précédemment définis, et correspond aux interventions réalisées successivement durant l'époque arabe —à partir de l'époque Hafside au XIII^e siècle— puis sous la régence turque —au temps du Beylik de l'Est du XVI^e siècle jusqu'à la modification des lieux après 1915. Toutefois, la documentation et les analyses menées n'ont pas permis d'établir avec précision l'ordre temporel des différentes unités stratigraphiques bâties rattachées à cet ensemble, malgré des signes distinctifs révélant clairement leur appartenance à des activités constructives différentes. Les recherches historiques et typologiques ont néanmoins permis d'interpréter cette unité chronologique comme représentant diverses phases de l'évolution de l'enceinte défensive de la cité historique.

La (figure. 65) présente le tracé des unités stratigraphiques bâties rattachées à l'entité [ChU_III], leur alignement sur les limites du Rocher historique atteste qu'elles ont été élevées sur les vestiges de l'ancienne muraille antique évoquée plus haut. Par ailleurs, l'hétérogénéité des matériaux et des techniques de construction, ainsi que la discontinuité apparente entre les fragments, confirment qu'il ne s'agit pas d'une même entreprise constructive volontaire et homogène.

Afin d'évaluer la validité de ce postulat, une inspection typologique effectuée sur l'ensemble du périmètre de la cité historique a permis d'identifier plusieurs fragments de remparts analogues aux unités relevées dans notre édifice. L'un de ces fragments, situé à l'Ouest de la Zaouïa, présente des meurtrières qui confirment la fonction défensive de la structure en question (Figure. 66).

Cette observation est confortée par la consultation des sources anciennes. Ainsi, dans sa description de la muraille, E. Mercier souligne l'irrégularité de la muraille de la ville, résultat des multiples réparations et reconstructions effectuées à la suite de sièges et d'offensives successives (Mercier 1903). Il la décrit parfois comme élevée sur plusieurs niveaux et mentionne l'existence de pâtés de maisons construits directement sur les vestiges de l'ancien rempart. Ces indications concordent avec nos propres résultats, démontrant que la Zaouïa s'élève bien sur les ruines de l'enceinte défensive de la cité historique.

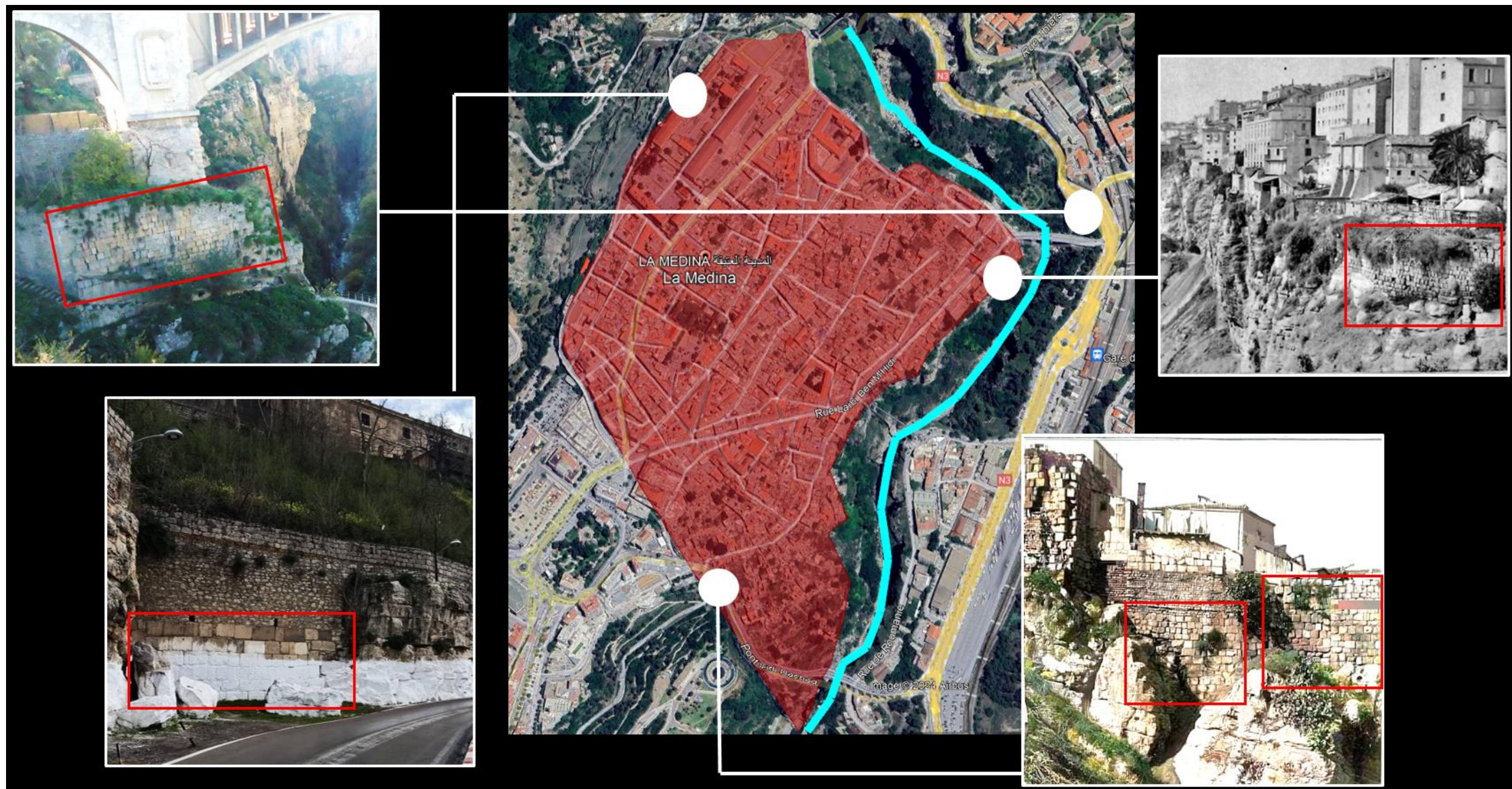


Figure 64: Identification des vestiges du Rampart de la cité antique romaine correspondant à l'unité chronologique identifié comme appartenant à l'époque romaine.

Traitement : auteure.

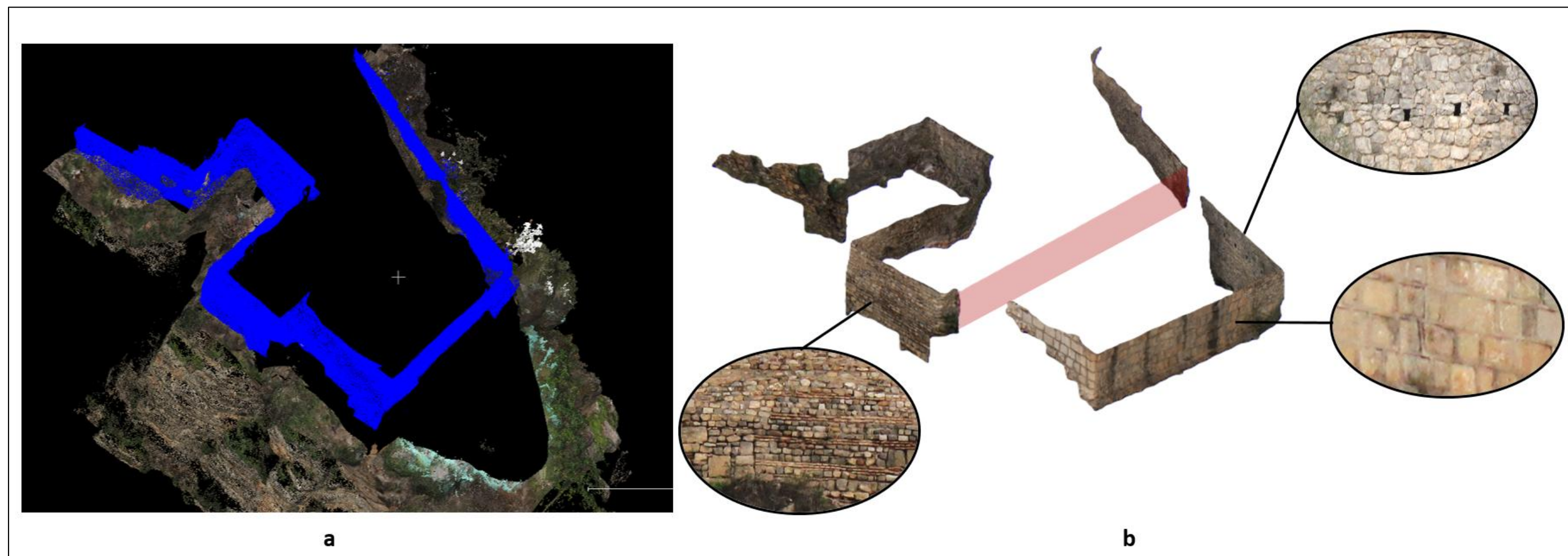


Figure 65: a : Tracé de l'unité chronologique [ChU_III], b : Unités stratigraphiques bâties appartenant à l'entité temporelle [ChU_III]

Traitement : auteure.

De son côté, A. Ravoisié, architecte de profession, livre une description plus méticuleuse et détaillée de cette enceinte. Dans son ouvrage consacré à l'exploration scientifique des vestiges architecturaux et artistiques de la province de Constantine, il insiste sur la grande hétérogénéité des matériaux employés lors des réparations du rempart et mentionne le réemploi, dans certaines parties, d'éléments purement décoratifs — fragments de corniches, sculptures, gravures — intégrés à la reconstruction des sections endommagées. Il souligne également les profondes transformations subies par la structure à durant l'époque arabe, en notant la médiocre qualité d'exécution de ces interventions au regard de l'ouvrage romain d'origine, et cela à travers les différentes phases allant du Bas-Empire romain jusqu'à la période arabe (Ravoisié 1846)[V^e – XIX^e siècles].

Enfin, il convient de rappeler que cette dernière unité chronologique, comprise entre le XIII^e et le XVIII^e siècle, pourra elle-même être subdivisée en plusieurs sous-unités, à mesure que progresseront les connaissances historiques, typologiques et temporelles.

Pour ce qui est de l'aspect fonctionnel de l'édifice, il est établi avec certitude qu'il servait déjà de mosquée à l'époque de Salah Bey. Cette information est rapportée par L. Féraud, qui s'appuie sur un document officiel datant de 1776 émanant de l'administration de Salah Bey, rédigé à la demande de ce dernier, et faisant état de l'inventaire des édifices religieux et des biens habous de son temps. Dans son article, Féraud joint une copie du texte authentique en Arabe, ainsi qu'un plan de la ville dressé peu après la conquête de Constantine en 1837 par les officiers d'État-Major de l'armée expéditionnaire française, indiquant l'emplacement des différents édifices religieux recensés du temps de Salah Bey [annexe. I]. On distingue clairement, à l'emplacement de l'actuelle Zaouia Sidi Rached, la mention de « mosquée Sidi Rached ». Toutefois, Féraud relève dans sa publication la pauvreté stylistique de l'édifice —entre autre mosquées— soulignant son manque de raffinement architectural(L. Féraud 1868).

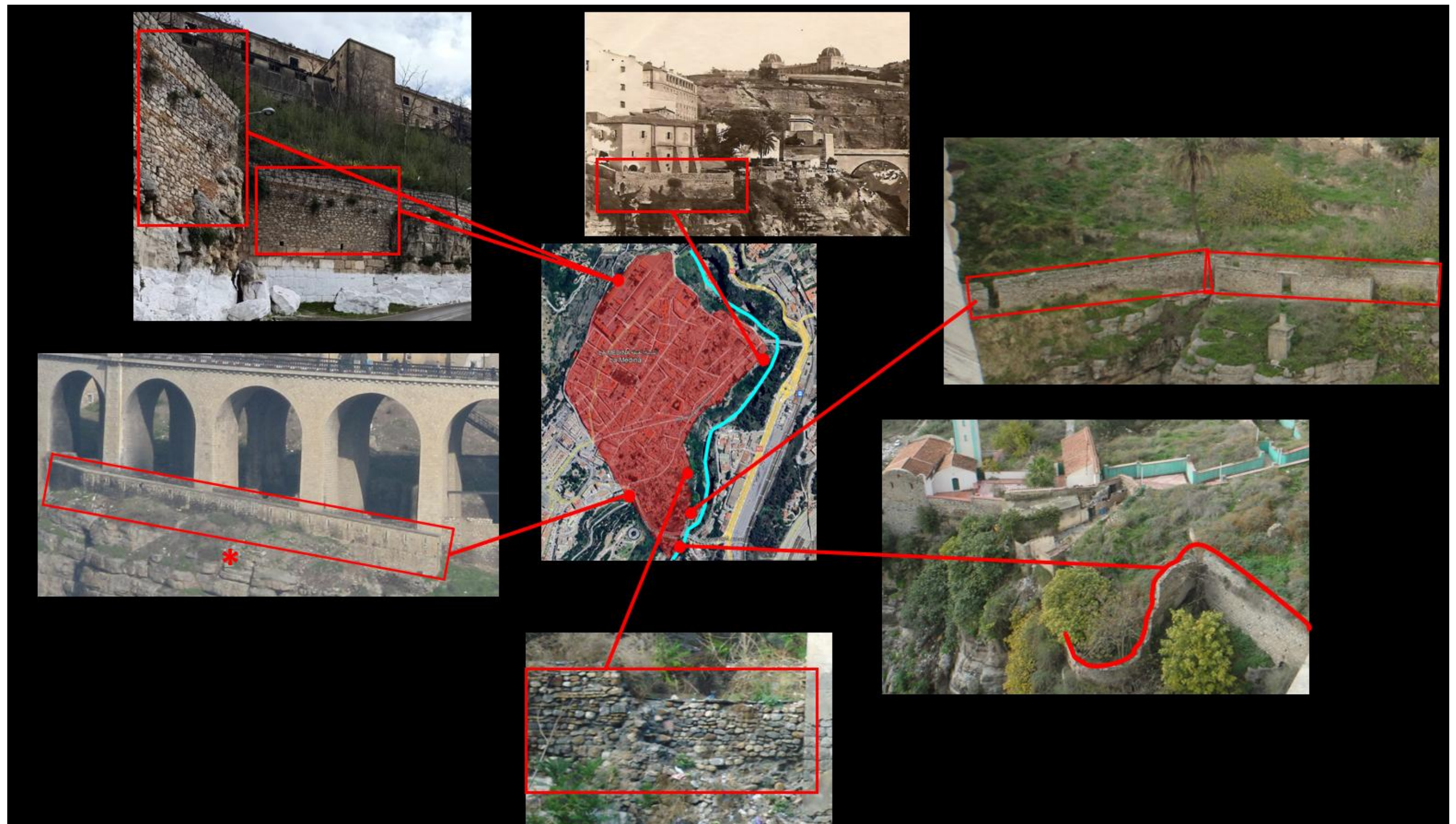


Figure 66: Identification des fragments du mur 'hybride' correspondant au rempart identifié par l'unité chronologique [ChU_III]. * fragment du rempart avec meurtrières

Traitement : auteure.

Par ailleurs, Léon l'Africain mentionne, dans sa description de Constantine, l'existence d'une grande mosquée, de deux médersas ainsi que de trois ou quatre zaouïas(al-Wazzan) 1896). N'ayant cependant pas précisé l'emplacement respectif de ces édifices, il demeure difficile d'affirmer avec certitude que la Zaouia Sidi Rached remplissait cette fonction au début du XVI^e siècle.

4.2.1.3. Intégration et visualisation des résultats de la classification stratigraphique et chronologiques :

Après avoir identifié les différentes entités stratigraphiques physiques — représentées par les unités stratigraphiques du bâti — et temporelles — correspondant aux unités chronologiques — nous avons proposé leur intégration et leur représentation au sein d'un espace de travail commun, afin de permettre une exploitation optimale et holistique des informations acquises.

Dans un premier temps, les résultats de la segmentation et de la classification des unités stratigraphiques du bâti, ont été enregistrés sous forme de nuage de points au format ASCII. Ce choix se justifie, d'une part, par la légèreté des modèles en nuages de points et la simplicité de leur traitement par rapport aux modèles maillés, et d'autre part, par la compatibilité du format ASCII avec différents logiciels, garantissant ainsi interopérabilité et interactivité à grande échelle.

Outre les données standard contenues dans les modèles ASCII — coordonnées spatiales (X, Y, Z), informations colorimétriques (Rf, Gf, Bf, Af), métadonnées (index du point dans le nuage d'origine) et informations des normales (Nx, Ny, Nz) — un label spécifique (annotation) a été attribué à chacune des unités stratigraphiques identifiées. Cette opération s'est traduite par l'affectation d'une valeur unique de champ scalaire permettant de caractériser tous les points appartenant à une même unité stratigraphique bâtie. Le tableau.6 illustre l'ensemble de ces informations pour les points appartenant à une unité stratigraphique bâtie

Tableau 6: Extrait du fichier ASCII présentant les attributs d'une unité stratigraphique bâtie du nuage de points

Filename: X:\V2\X2\CH2\X2\IndexOriginal_Productions_IndexTable.rpt											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
coord. X	coord. Y	coord. Z	Red.float (0-1)	Green.float (0-1)	Blue.float (0-1)	Scalar	Label	Scalar	Nx	Ny	Nz
4693228											
-3.76433897	-0.49958904	8.74710655	0.411765	0.266667	0.215686	1	1.000000	0.000000	0.243677	-0.808637	-0.535470
-3.69139576	-0.46732366	8.73256111	0.360784	0.254902	0.203922	1	1.000000	0.000000	0.360635	-0.919129	0.158567
-3.55555582	-0.41890430	8.73405351	0.27451	0.160784	0.145098	1	1.000000	0.000000	0.999999	0.000978	0.000978
-3.52651963	-0.41728687	8.74170017	0.498099	0.337253	0.313723	1	1.000000	0.000000	0.999999	0.000978	0.000978
-3.58319569	-0.43369174	8.75420094	0.403922	0.345098	0.282353	1	1.000000	0.000000	0.304777	-0.950337	-0.063013
-3.94107056	-0.55962968	8.72006764	0.647059	0.588235	0.568627	1	1.000000	0.000000	0.960571	-0.248941	0.123019
-3.80107565	-0.43308163	8.73603725	0.407843	0.258624	0.215686	1	1.000000	0.000000	0.999999	0.000978	0.000978
-4.00674915	-0.37413664	8.76101303	0.788235	0.780392	0.756863	1	1.000000	0.000000	-0.784286	-0.552402	-0.184265
-3.63198345	-0.45301437	8.74221802	0.423529	0.262745	0.239216	1	1.000000	0.000000	0.999999	0.000978	0.000978
-3.91448877	-0.54241705	8.72151279	0.6	0.521589	0.47451	1	1.000000	0.000000	0.368226	-0.894886	0.252878
-3.66211991	-0.45696735	8.75687885	0.254902	0.160784	0.145098	1	1.000000	0.000000	0.999999	0.000978	0.000978
-3.61291170	-0.44053090	8.75625229	0.662745	0.564706	0.54902	1	1.000000	0.000000	0.509738	-0.155593	-0.411395
-3.62622070	-0.45068411	8.75938465	0.490196	0.360784	0.364706	1	1.000000	0.000000	0.390146	-0.872884	-0.252885
-3.56405937	-0.37915707	8.76044464	0.392157	0.305882	0.262745	1	1.000000	0.000000	0.999999	0.000978	0.000978
-3.65324354	-0.46396330	8.76905623	0.223529	0.152941	0.129412	1	1.000000	0.000000	0.122799	-0.779699	-0.673995
-3.66598845	-0.45741838	8.75892758	0.603922	0.458624	0.407843	1	1.000000	0.000000	0.937150	-0.890265	-0.272765
-3.90889655	-0.54357946	8.70185852	0.521589	0.462745	0.368627	1	1.000000	0.000000	0.433339	-0.852799	-0.291463

Une fois ces données enregistrées, le nuage de points pré-segmenté, a été importé dans le logiciel de visualisation stratigraphique précédemment présenté. Celui-ci organise et documente les informations selon trois classes principales : le bâtiment stratifié, ces unités stratigraphiques bâtie, et ses unités chronologiques (voir supra, chapitre 3, § 3.2.2.2). Dans l'interface, le fichier ASCII est affiché sous forme de modèle 3D dans la visionneuse graphique, tandis que ses attributs apparaissent dans le panneau de données sous une structure hiérarchique arborescente (figure 67).

Dans cette arborescence, le nœud parent, intitulé le bâtiment stratifié (The_Stratified_Building), regroupe les informations générales du nuage de points (nom de l'édifice, options d'affichage par calques, etc.). Ce nœud principal comporte deux sous-classes : les unités stratigraphiques bâties (stratigraphic_building_units) et les unités chronologiques (chronological_units), qui structurent et organisent les données recueillies.

- La première sous-classe —stratigraphic building units— rassemble les différentes unités stratigraphiques bâties identifiées. Chaque unité est, associée à un label unique et, est représentée comme une couche distincte. Ces couches comportent des attributs spécifiques à renseigner : nom de l'unité, calque colorimétrique, dates approximatives de début et de fin, ainsi que l'unité chronologique à laquelle elle appartient. Elles peuvent être affichées ou être masquées, individuellement, via l'option 'Show'.

- La seconde sous-classe —chronological units— regroupe les entités temporelles définies par l'analyse. Chacune d'entre elles peut être créée et documentée en renseignant ses bornes chronologiques, son calque colorimétrique, ainsi que les unités stratigraphiques qui y sont incluses. Comme pour les unités stratigraphiques, les calques chronologiques peuvent être activés ou désactivés selon les besoins de l'utilisateur en cochant la case 'show'.

Ainsi, chaque entité stratigraphique introduite et documentée est automatiquement cartographiée dans le nuage de points 3D par codage colorimétrique. L'utilisateur peut, dès lors, choisir entre plusieurs modes d'affichage : la texture réelle de l'édifice, la visualisation par calques d'unités stratigraphiques bâties, ou encore la représentation des unités chronologiques. La (figure 68) illustre ces différents modes de représentation.

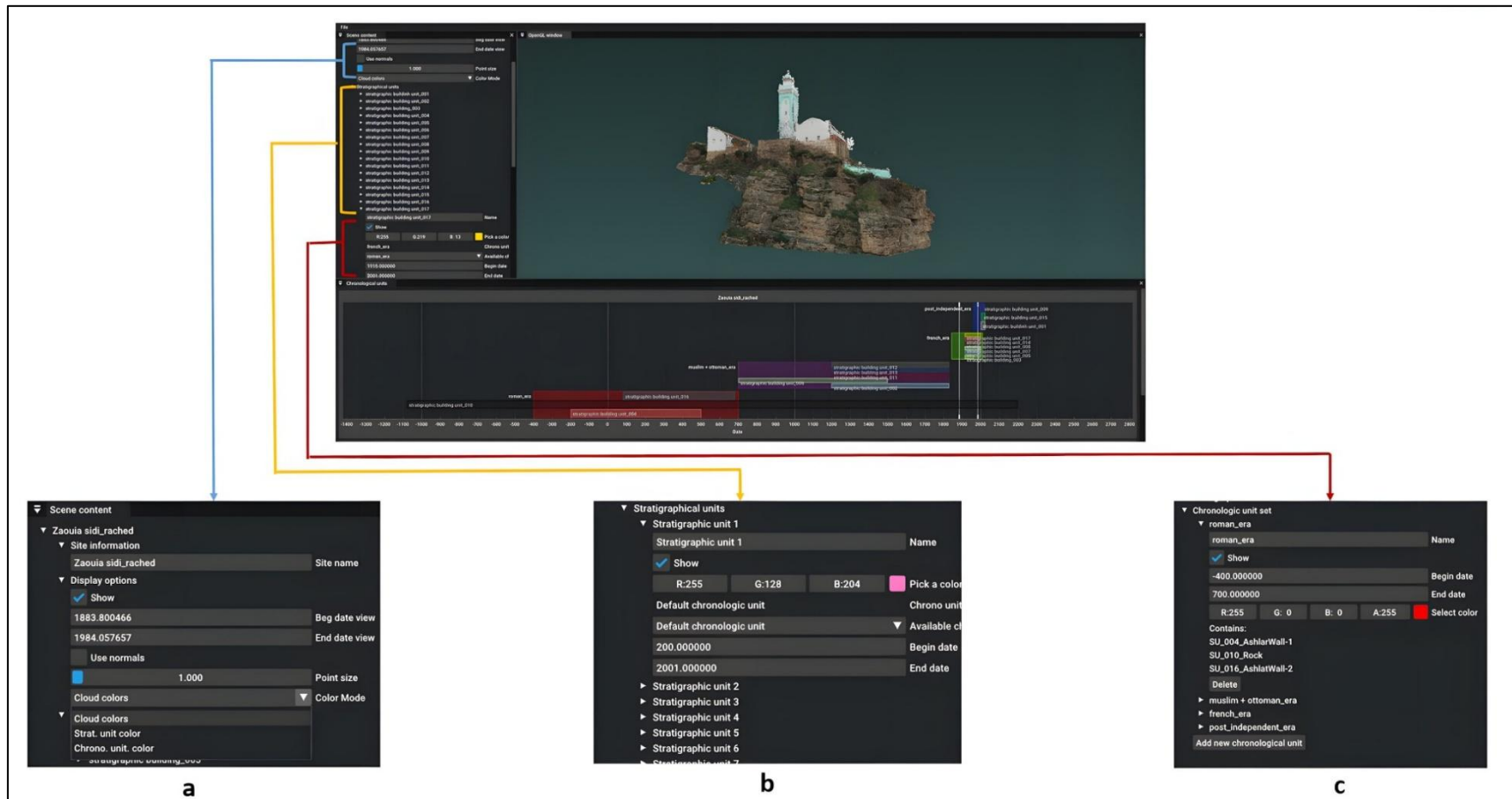


Figure 67: Interface graphique du logiciel créé pour la visualisation stratigraphique. a : informations générales du site, b : instances des unités stratigraphiques du bâti, c : instances des unités chronologiques

Source : Auteure

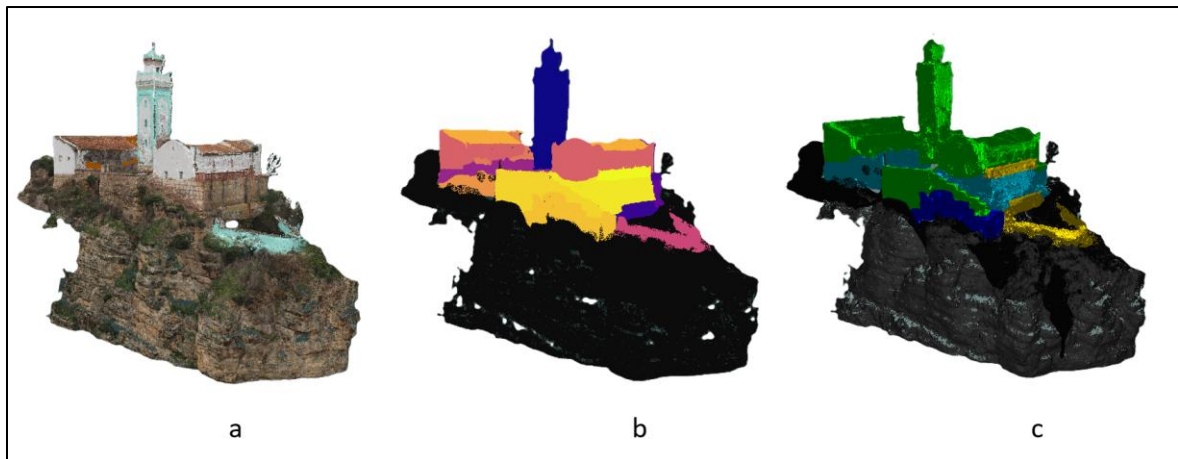


Figure 68: Différents modes d’affichage des informations stratigraphiques. a : Par texture des matériaux de construction, b : par calques d’unités stratigraphiques du bâti, c : par calques d’unités chronologiques

Source : Haouacha et al. 2025

En complément des représentations graphiques, les données temporelles introduites dans le panneau d’informations, permettent de générer, en temps réel, une frise chronologique dans la section de l’interface dédiée à l’affichage de la séquence stratigraphique. Cette frise est constituée d’un ensemble d’axes temporels correspondant aux différentes unités stratigraphiques bâties, chaque axe reprenant le code couleur qui lui a été attribué dans le panneau des données et dans la scène 3D. Ces axes sont encapsulés au sein de cadres plus larges représentant les unités chronologiques, lesquels adoptent également les codages colorimétriques définis dans l’arborescence hiérarchique et les calques d’annotation du nuage de points.

Deux barres de défilement offrent la possibilité de naviguer dynamiquement dans la scène 3D en sélectionnant les unités chronologiques à afficher. Cette fonctionnalité permet de visualiser, selon les bornes temporelles choisies, les différents cycles stratigraphiques du bâti. La (figure. 69) illustre cette dynamique à travers la mise en évidence des cycles stratigraphiques de la Zaouia avant et après la construction du pont Sidi Rached.

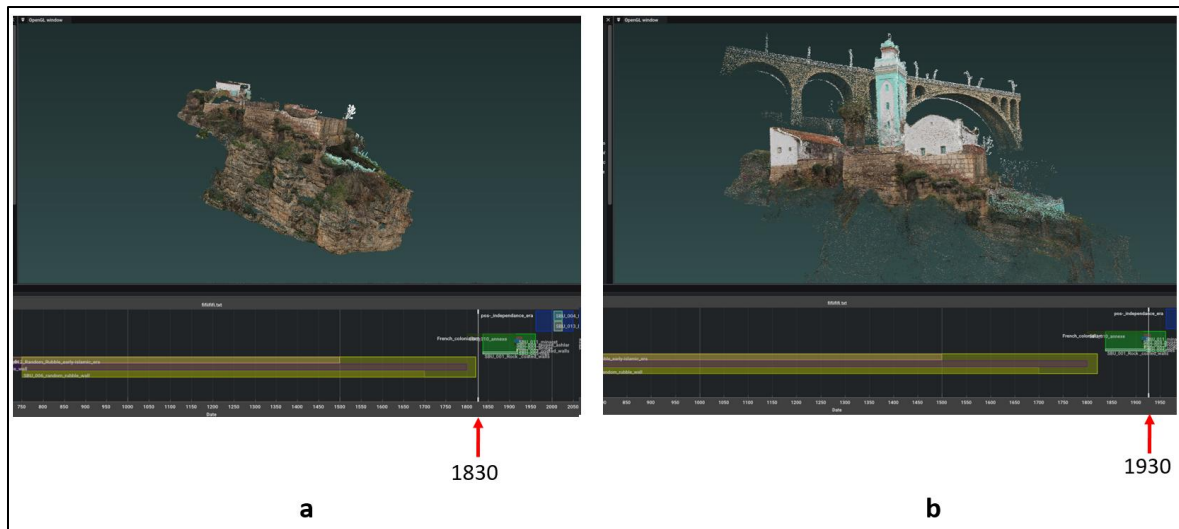


Figure 69: Visualisation interactive de l'évolution morphologique à travers la navigation chronologique. a : cycle stratigraphique avant la construction du pont, b : cycle stratigraphique après la construction du pont

Source : Auteure.

4.2.2. Evaluation des résultats :

4.2.2.1. Apport de l'approche proposée à la stratigraphie architecturale

Les résultats de l'étude stratigraphique menée sur la zaouïa Sidi Rached confirment la fiabilité du workflow proposé et soulignent ses apports à plusieurs niveaux. L'usage des modèles 3D comme support principal d'analyse et de représentation a permis d'appréhender les œuvres historiques dans leur spatialité tridimensionnelle, leurs formes et échelles complexes, façonnées par le temps et les transformations, ainsi que leurs textures variées et riches. À cette lecture matérielle s'ajoute l'intégration de dimensions immatérielles grâce à l'annotation sémantique des maquettes numériques, ouvrant la voie à une compréhension plus complète et holistique des édifices étudiés. Enfin, les modèles 3D offrent des perspectives de partage, d'archivage et de réutilisation, permettant la ré-exploitation et l'actualisation future des données enregistrées.

Par ailleurs, les avancées en vision par ordinateur appliquées aux modèles 3D, ont rendu possibles des opérations de segmentation et de classification plus rapides et plus rigoureuses, entraînant un gain considérable en temps, notamment pour l'étude d'artefacts de grandes échelles. L'usage de ces outils a également révélé des réalités matérielles difficilement perceptibles par les méthodes d'inspection traditionnelles, fondées sur l'observation directe. C'est le cas, par exemple, de la classification basée sur la texture (voir supra. §.4.2.1.2.), qui a mis en évidence le réemploi de matériaux provenant de structures anciennes dans la

construction d'extensions françaises lors des travaux de rénovation de la Zaouia suite à l'édification du pont. De même, la segmentation pierre à pierre réalisée sur le nuage de points a permis d'identifier avec précision les zones de transformation et d'intervention marquant les interfaces entre les unités stratigraphiques distinctes, tâche particulièrement ardue lors d'un relevé manuel, surtout lorsque ces interfaces se situent dans des zones inaccessibles ou difficilement atteignable par les experts et les arpenteurs.

Ainsi, le recours aux modèles 3D capturés de la réalité, garantit une segmentation et une identification plus précises des entités stratigraphiques, en comparaison aux modèles paramétriques ou bidimensionnelles utilisées auparavant, et ce, quelle que soit la complexité morphologique et spatiale des édifices patrimoniaux. À l'échelle de notre cas d'étude, et plus largement des œuvres historiques, les unités stratigraphiques ne correspondent pas toujours à des éléments architecturaux achevés et clairement définis. Elles sont souvent constituées d'assemblages hybrides de vestiges et de matériaux hétérogènes, issus de périodes, de natures et d'états de conservation variés, conséquence de réparations et de transformations successives. C'est précisément le cas du rempart antique de Constantine, servant de soubassement à la construction de la mosquée-zaouïa Sidi Rached.

Un autre atout de l'approche proposée réside dans sa modularité. L'utilisation de différentes modalités et outils pour le traitement des nuages de points et l'identification des entités stratigraphiques, offre une grande flexibilité et est, adaptable selon les cas d'étude, aux échelles et au degré de granularité souhaité. Comme indiqué au chapitre précédent (voir supra, §.3.2), la littérature recense plusieurs méthodes et programmes dédiés à la classification, à la reconnaissance et à l'interprétation des modèles 3D, qui peuvent être choisis en fonction des objectifs visés. Grâce à l'enregistrement des modèles 3D dans des formats standards et interopérables (ASCII, PLY, OBJ ... etc.), un même modèle peut être exploité par plusieurs intervenants et différents logiciels, générant de nouvelles connaissances sans perte d'informations.

Par ailleurs, l'enrichissement des modèles 3D par des données non graphiques, grâce à l'annotation et à l'intégration de dimensions temporelles, ouvre la perspective à l'étude de la stratification architecturale dans sa multi-dimensionnalité. La visualisation par calques thématiques — unités stratigraphiques bâties ou chronologiques — permet de reconstituer la genèse morphologique des édifices à travers l'histoire et fournit une base solide pour la formulation d'hypothèses de restitutions historiques, particulièrement utiles pour des bâtiments

peu ou mal documentés, comme est le cas de la zaouïa Sidi Rached. Cette approche facilite également, la compréhension des logiques d'évolution et des interactions entre les différentes parties du bâti, contribuant à l'explication de phénomènes pathologiques et de comportements structuraux, et par conséquent, à la planification d'interventions appropriées.

La figure 70 illustre ainsi, les différentes unités chronologiques de la zaouïa. Elle met en évidence l'ampleur des dégradations subies par la muraille romaine de ce côté de la ville (en rouge fig. 70.a), ainsi que les types de réparations apportées par les civilisations suivantes (en violet fig. 70.b). Pour l'aspect historique des lieux, ces observations suggèrent que ce secteur de la ville fut particulièrement exposé aux attaques, hypothèse corroborée d'une part par l'étroitesse du ravin au niveau de la pointe Sidi Rached — d'où l'existence de fortifications de l'autre rive du ravin, aujourd'hui disparues (Ravoisié 1846) — et d'autre part par la position dominante du plateau d'El Mansourah, d'où furent lancées plusieurs offensives (Mercier 1903). Cela explique les importantes réparations observées sur cette portion du rempart, caractérisées par une forte hétérogénéité des matériaux, des techniques constructives et des styles architecturaux.

Enfin, la (fig. 70.c) met en évidence la nature des travaux de rénovation entrepris au XX^e siècle par l'administration française (en vert). Ceux-ci visaient non seulement à assurer la stabilisation de l'édifice, mais également à renforcer sa visibilité, étant donné sa situation au premier plan sur la silhouette urbaine de la ville historique. Ces interventions se matérialisent notamment par l'ajout d'extrémités arquées aux pignons du bâtiment — malgré l'absence de toiture voûtée — et par l'édification d'un minaret conférant à la zaouïa une verticalité marquée et un poids visuel accentué.

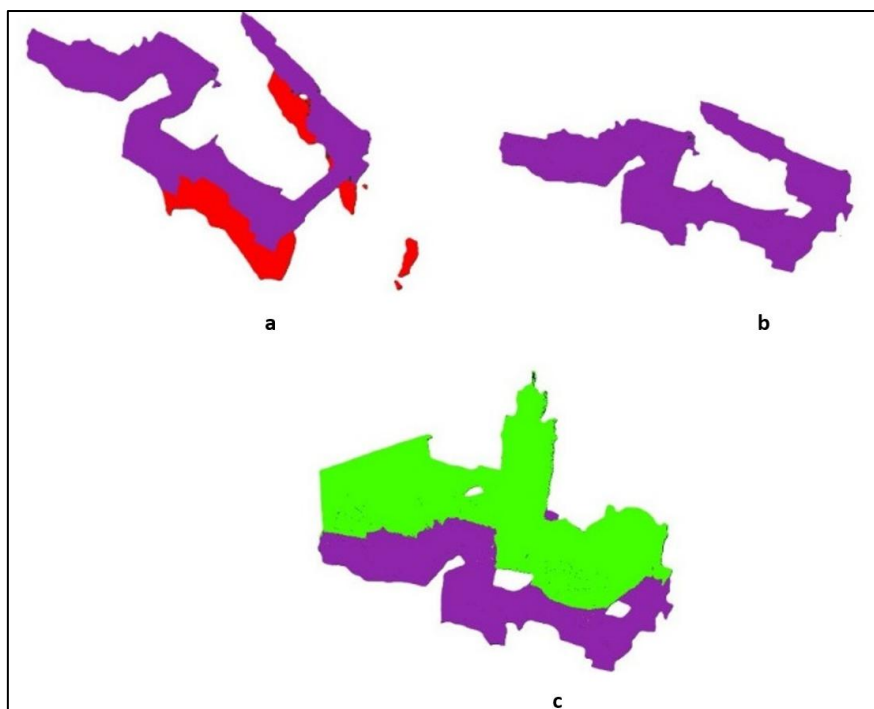


Figure 70: Organisation spatiale des unités chronologiques.

Source : Haouacha et al.2025

Sur le plan chronologique, le recours à des axes temporels imbriqués pour l’affichage des séquences stratigraphiques, offre la possibilité de visualiser à la fois les relations relatives et les temporalités quantifiées entre les différentes unités bâties : leur ordre d’occurrence, leurs phases de coïncidence et de coexistence, ainsi que les moments de transformation. Par ailleurs, ce dispositif met en évidence les rapports entre unités chronologiques et unités stratigraphiques du bâti, en précisant le moment d’apparition de chaque élément dans une époque donnée et la durée de vie d’une morphologie donnée en tant qu’œuvre stable.

La structure modulaire de la frise chronologique proposée, permet également de sélectionner une phase précise et délimitée dans le cycle de vie du bâtiment, afin d’en faire une analyse et une visualisation plus approfondies. Cette fonctionnalité se révèle particulièrement pertinente pour les édifices pluriséculaires à stratification dense. En effet, la multiplicité des unités stratigraphiques et chronologiques dans ce type de sites, tend à surcharger le graphique chronologique et à en rendre la lecture complexe, notamment dans les zones à forte accumulation. La possibilité de filtrer un extrait du graphique séquentiel offre alors un outil efficace pour se concentrer sur une période donnée et en restituer les dynamiques de manière plus lisible (figure.71).

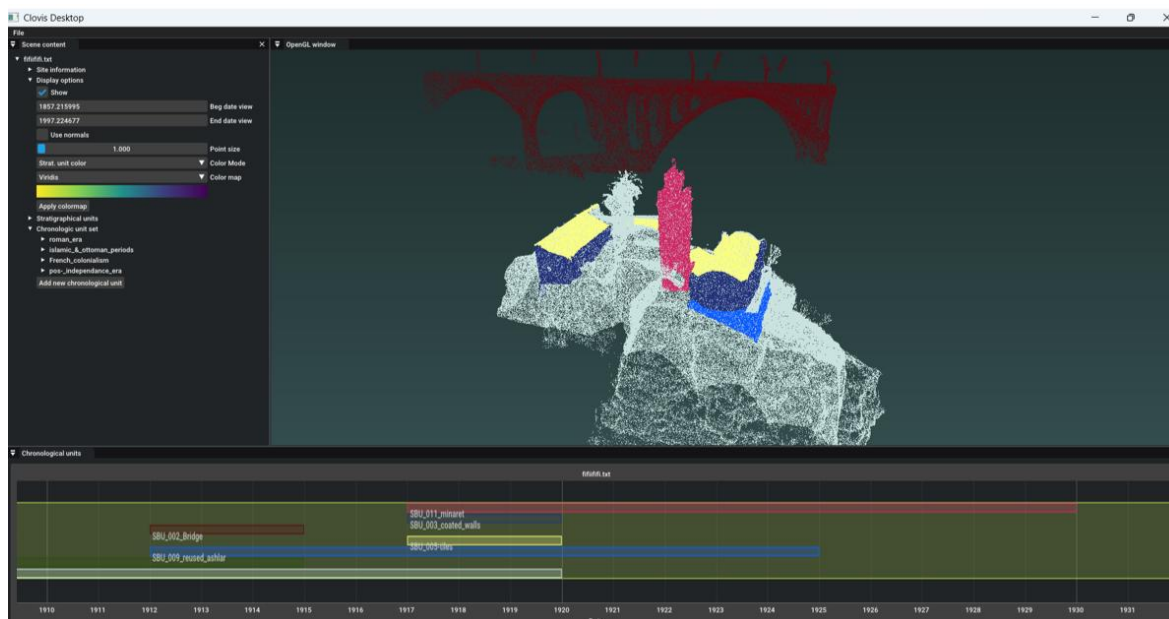


Figure 71: Gros plan sur les unités stratigraphiques du bâti associées à l'unité chronologique [ChU I] 'Intervention française' [1900-1930].

Source : auteure.

Pour finir, la navigation dynamique et interactive en 4D entre le modèle 3D et la frise chronologique offre la possibilité d'appréhender la morphogenèse du bâtiment à travers un processus virtuel de déconstruction/ reconstruction. Elle permet de visualiser les états intermédiaires qui jalonnent l'évolution de l'édifice actuel et d'améliorer la compréhension des causes de transformation et de dégradation, des solutions architecturales mises en œuvre ainsi que du comportement structurel conséquent. Un tel dispositif constitue ainsi, un outil pertinent pour orienter la prise de décision en matière de conservation et de restauration des biens patrimoniaux.

4.2.2.2. Limites de la méthode et difficultés rencontrées :

Malgré les avancées indéniables offertes par le système d'information proposé, plusieurs difficultés sont apparues au cours de l'étude de cas, mettant en évidence ses limites ainsi que les améliorations nécessaires pour y remédier.

L'une des principales contraintes concerne l'acquisition et la qualité du modèle 3D. Le problème des occlusions, lié à la présence de végétation et de lichens denses autour de plusieurs parties de la zaouïa Sidi Rached, a rendu extrêmement difficile le relevé détaillé de certaines zones. Leur suppression dans la scène entraîne la formation de lacunes importantes dans le modèle 3D, comme l'illustre la (figure 72). La tentative de reconstruction, par interpolation de

ces zones, entraîne inévitablement, une part d'incertitude, notamment, lorsque la densité de ces organismes envahissants empêche de déterminer avec précision la nature des matériaux sous-jacents. Même lorsque des photographies anciennes permettent d'identifier les matériaux recouverts, il demeure extrêmement difficile de restituer fidèlement la texture actuelle, étant donné que son état de conservation reste inconnu.



Figure 72: Occlusions causées par la présence de végétation et de lichens

Source : Auteure

Cette situation a également, généré des difficultés lors de la segmentation et de la délimitation des unités stratigraphiques du bâti. Deux modalités ont alors été mises en œuvre : dans les zones où la texture originelle pouvait être reconnue grâce aux photographies historiques, les parties altérées ont été intégrées manuellement à la classe correspondante lors de l'entraînement des algorithmes. En revanche, pour les zones dont la texture originelle restait inconnue, elles ont été isolées et considérées comme une unité stratigraphique spécifique, désignée sous le terme d'« *unité de dégradation* »(Villalobos 2024).

Il convient également de souligner que la méthode proposée s'applique exclusivement aux ouvrages en maçonnerie apparente, ou à ceux dont le revêtement a été appliqué simultanément à la construction de la partie qu'il recouvre, et dont la contemporanéité à celle-ci est avérée. Pour les bâtiments dont les surfaces sont recouvertes d'un revêtement externe dissimulant totalement les parties sous-jacentes, le recours à des techniques d'imagerie non destructive en profondeur — telles que la tomographie, la radiographie ou les radars à pénétration de sol — s'avère indispensable. Dans certains cas, des méthodes plus invasives, comme le micro-carottage, peuvent également être mises en œuvre afin d'accéder à des informations sur les matériaux et les structures internes

4.2.2.3. Perspectives et pistes de recherche futures :

Si les innovations potentielles du système d'informations stratigraphique proposé, semblent confirmées par les résultats obtenus lors de l'étude de cas de la Zaouïa Sidi Rached, il demeure nécessaire d'élargir le champ expérimental afin d'en valider pleinement les apports. L'application de l'approche proposée à des complexes densément stratifiés ou à des sites historiques de plus grande envergure pourrait contribuer au perfectionnement du système global. Une telle expérimentation permettrait d'évaluer sa capacité à gérer des volumes importants de données, qu'il s'agisse de l'affichage des frises chronologiques, des rendus graphiques de la scène 3D, ou encore de la gestion des interactions entre ces deux dispositifs.

Par ailleurs, la représentation explicite des parties temporellement indéfinies ou incertaines constitue une tâche essentielle. Leur stockage et leur classification en tant qu'unités d'origine indéterminée garantiraient non seulement l'objectivité et la fiabilité scientifique de la recherche, mais ouvriraient également la voie à des investigations futures, en permettant une mise à jour continue des informations générées.

De plus, l'intégration des différentes sources ayant conduit à la classification matérielle et temporelle représenterait un apport incontournable en termes de transparence et de rigueur scientifique. L'inclusion des supports d'analyse et de lecture, accessibles pour consultation et visualisation dans le logiciel de représentation stratigraphique multidimensionnelle — par le biais de liens externes ou de commandes de renvoi vers une base de données — renforcerait considérablement la valeur et la fiabilité du travail. L'abondance et l'hétérogénéité des informations pourraient être convenablement gérées grâce à la mise en place d'une ontologie regroupant les différents types de données, leurs significations et leurs relations.

Enfin, le développement d'un module de requête, fondé sur les données recueillies au cours de la recherche, permettrait un recoupement efficace des informations en vue d'une meilleure compréhension des œuvres étudiées et de la génération de nouvelles connaissances. À titre d'exemple, il serait possible de formuler des requêtes telles que : 'filtrer toutes les parties construites en pierre de taille et rattachées à l'unité chronologique du Bas-Empire romain' ou encore 'afficher les unités stratigraphiques rattachées simultanément à deux unités chronologiques distinctes : l'unité de construction initiale et la phase de réemploi'.

Conclusion du chapitre :

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre la méthode stratigraphique architecturale proposée, en détaillant les différentes étapes du système d'information : acquisition, traitement,

exploration, représentation et lecture des résultats. L'étude de cas a permis de démontrer, d'une part, la pertinence méthodologique de notre approche en tant que processus de décomposition et de visualisation rétrospective d'un phénomène complexe tel que la stratification, et d'autre part, l'efficacité du workflow développé pour documenter et comprendre l'histoire constructive, morphogénétique et structurelle de l'édifice étudié.

La méthode proposée a montré sa capacité à traiter de manière optimale les données stratigraphiques dans leur multi-dimensionnalité, en valorisant les spécificités des œuvres bâties — spatialité, morphologie et genèse séquentielle. Elle contribue ainsi à mettre en évidence leur système de valeurs, leur complexité morphologique et leur comportement structurel, en vue d'une meilleure planification des modalités d'intervention.

Par ailleurs, l'étude expérimentale a permis d'identifier les difficultés rencontrées, les solutions apportées et les limites observées. En dépit des avancées offertes par l'intégration des modèles 3D et des technologies de l'industrie 4.0, certaines contraintes persistent, nécessitant encore le recours à des méthodes traditionnelles — inspection visuelle en cas d'occlusion, organisation manuelle des données historiques. Ces constats ouvrent de nouvelles perspectives de recherche, parmi lesquelles l'intégration d'ontologies, afin d'améliorer la gestion, l'organisation et l'exploitation des informations et des connaissances.

Conclusion de la partie II :

Cette partie a constitué les volets méthodologique et expérimental de notre recherche. Après avoir abordé, dans la première partie, la stratification comme phénomène morphologique récurrent et complexe dans le patrimoine bâti, nous nous sommes concentrés ici sur les moyens de son étude, de sa compréhension et de sa représentation en tant que réalité spatiotemporelle intelligible. Notre démarche s'est appuyée à la fois, sur les limites de l'approche stratigraphique classique, héritée de l'archéologie et appliquée en architecture, et sur la nécessité de développer de nouveaux outils à la lumière des technologies numériques et des apports de l'industrie 4.0.

Le troisième chapitre a été consacré à la proposition d'une approche stratigraphique adaptée à l'architecture historique. Nous avons d'abord, explicité la logique sous-jacente à notre intervention en décrivant la stratification architecturale à travers ses composantes fondamentales et leur articulation, afin de la rendre analysable et compréhensible. Cela nous a conduit à définir un modèle conceptuel de données, conçu pour représenter la stratification comme un processus constructif diachronique à l'origine de la morphologie et de la spatialité complexes des œuvres bâties multicouches. Ce modèle, aligné sur les standards internationaux tels que le CIDOC-CRM et ses extensions liées au patrimoine matériel, permet d'envisager l'artefact en termes d'entités physiques et chronologiques imbriquées et d'établir les concepts de base nécessaires à l'analyse de l'architecture historique. L'objectif est double : mettre en évidence les valeurs historiques et constructives —matérielles et sémantiques— propres aux œuvres du patrimoine bâti, et mettre en œuvre une assise rationnelle contribuant à la reconstitution de leurs états passés en vue de l'aide à l'orientation et à l'assistance de prise de décision en matière de conservation du patrimoine bâti.

Nous avons ensuite précisé les approches méthodologiques retenues pour la documentation et le traitement des concepts définis, en mobilisant les avancées récentes en acquisition, traitement et représentation des données scientifiques relatifs au bâti historique.

Dans l'approche proposée, la maquette numérique 3D, issue de la capture de la réalité, constitue le principal support pour l'ensemble du processus analytique. Elle sert à la fois de base pour l'identification des sous-ensembles stratigraphiques, mais également d'outil pour la projection, l'annotation et l'intégration des différents types de données recueillies.

Par ailleurs, le modèle 3D joue un rôle essentiel dans l'interprétation et la communication des résultats issus de la lecture stratigraphique. Comme il a été démontré, le recours à un modèle tridimensionnel en tant que référentiel d'analyse a permis d'ouvrir la voie à divers procédés de

segmentation, de classification, d'organisation et de visualisation des informations stratigraphiques.

Enfin, l'ensemble du dispositif a été intégré dans un système d'information, permettant l'agrégation, la structuration et la représentation cohérente du workflow complet — incluant les outils, les procédures et les technologies mobilisées pour la lecture stratigraphique du bâti.

L'expérimentation menée sur la Zaouïa Sidi Rached de Constantine, a permis de mettre en application la totalité de notre démarche. Les résultats ont démontré la pertinence de notre approche pour comprendre la stratification des édifices historiques et optimiser la gestion des connaissances et hypothèses relatives à leurs états successifs. Ils ont également montré la capacité de notre méthode à dépasser certaines limites du diagramme de Harris, notamment en explorant la tridimensionnalité des œuvres, en prenant en compte leur multi-dimensionnalité et en intégrant simultanément chronologie relative et temporalité quantifiée.

L'utilisation de la maquette numérique issue de la réalité, a favorisé l'intégration de procédés semi-automatisés issus des TIC, ouvrant l'accès à des résultats de segmentation et de classification jusqu'alors inatteignables avec l'approche traditionnelle, aussi bien sur le plan cognitif, qu'en matière de gestion du temps et du travail in situ. Notre méthode propose ainsi une lecture basée sur une approche non destructive de la stratification architecturale, passant d'une représentation bidimensionnelle cumulative à une lecture spatiale en 3 dimensions. Elle permet également la transition d'une représentation de la chronologie relative à une chronologie quantifiée inscrite dans le temps historique. Enfin l'approche proposée marque une évolution de la méthode stratigraphique globale, d'un enchaînement fragmenté de tâches à un flux de travail intégré. Cette approche méréologique et holistique constitue une condition essentielle à l'intelligibilité de la genèse morphologique, par opposition à l'analyse cumulative et dispersée de la méthode classique.

Enfin, l'étude de cas a permis non seulement de retracer l'évolution morphogénétique et historique de la Zaouïa Sidi Rached, mais aussi de mettre en évidence les difficultés rencontrées et les limites de la démarche proposée. Celles-ci tiennent notamment à l'influence déterminante de la qualité des modèles 3D générés sur les résultats de traitement et d'interprétation, ainsi qu'à la nécessité d'une gestion rigoureuse de l'abondance et de l'hétérogénéité des données mobilisées. Ces constats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'amélioration de l'approche proposée, comme l'intégration d'une ontologie, permettant une liaison fiable et structurée des différents types de données stratigraphiques

Chapitre Conclusif

Conclusion générale :

L'attention portée aux vestiges bâtis des anciennes civilisations, remonte aux premières formes de productions architecturales. Qu'il s'agisse de la réutilisation des matériaux et des édifices, de leur appropriation comme vecteurs d'expressions utilitaires, politique ou artistique, de la déprédation des antiquités ou encore de leur mobilisation comme sources de savoirs ancestraux et culturels, les artefacts transmis au fil de l'histoire, ont toujours fait l'objet de récupérations et de réappropriations, que ce soit à l'échelle des matériaux et éléments architectoniques, des édifices entiers, ou encore des ensembles architecturaux ou urbains plus vastes.

Ces pratiques trouvent leur expression la plus manifeste dans la stratification architecturale, phénomène omniprésent dans les œuvres du patrimoine bâti. Elle se manifeste par une imbrication et un enchevêtrement de matériaux, d'éléments constructifs, d'espaces et d'expressions stylistiques, conférant aux édifices une morphologie riche et complexe. Les surfaces bâties portent ainsi les traces intelligibles du processus long et complexe de leur histoire constructive, offrant un témoignage tangible des phases successives d'édification, de transformation et de réappropriation.

Une étude approfondie des origines et des facteurs ayant conduit à l'émergence de cette morphologie complexe a démontré que la stratification ne résulte pas d'une simple altération accidentelle ou imposée de l'état initial des œuvres bâties, mais qu'elle constitue bien souvent un acte délibéré, réfléchi et planifié.

D'abord perçue à l'antiquité et au moyen âge comme une spoliation des œuvres historiques emblématiques de leur époque d'édification, cette transformation se manifestait fréquemment sous la forme d'une réappropriation de l'espace ancien par de nouveaux occupants, soit en signe de suprématie, soit dans une logique d'adaptation et d'intégration pacifique.

D'autres formes de remaniement découlaient quant à elles de considérations strictement utilitaires, motivées par des besoins concrets et par une recherche d'économie de coûts, de temps ou de ressources matérielles.

À partir de la Renaissance, les œuvres du passé ont acquis une dimension symbolique et morale accrue, empreinte d'un respect quasi sacré. La stratification s'est alors affirmée comme emblème historique, mais aussi comme objet de savoir et de mémoire.

A l'aube du XX^e siècle, les architectures à strates multiples ont cessé d'être perçues comme de simples productions de leur temps pour devenir les témoins d'une diachronie, révélant le processus long et continu de la genèse spatial et morphologique de l'environnement bâti. La

configuration même de la stratification est depuis considérée comme un phénomène digne d'observation et de reconnaissance.

La stratification architecturale a dès lors joué un rôle fondamental, à la fois sur le plan figuratif et structurel, mais aussi, sur le plan sémantique des édifices. En effet, la stratification incarne le continuum culturel et l'histoire évolutive des sociétés, inscrits dans la matérialité et la surface de leurs espaces bâtis, constituant ainsi le cœur même de leur valeur patrimoniale.

D'un point de vue technique, elle s'exprime à travers des dynamiques morphologiques et structurelles qui influencent autant l'aspect visuel et esthétique des œuvres que leur stabilité et leur intégrité matérielle.

Une œuvre stratifiée peut ainsi être envisagée comme une structure diachronique spatio-temporelle, constituée d'unités constructives synchroniques sous-jacentes, articulées entre elles par un processus génétique et des relations topologiques et chronologiques.

Sur le plan matériel, la stratification se manifeste à travers une diversité de formes à différentes échelles: multiplicité de matériaux dans un même édifice, coexistence de techniques et de styles, ou encore, superposition d'espaces architecturaux et urbains. Elle révèle ainsi, un processus évolutif tridimensionnel, qui échappe à la simple logique d'empilement gravitaire de la matière.

La question de la stratification a toujours occupé une place centrale dans les débats intellectuels et professionnels autour de la conservation-restauration du patrimoine bâti. Qu'il s'agisse de doctrines élaborées par des théoriciens et des chercheurs en architecture historique, ou du discours pratique porté par les architectes conservateurs et restaurateurs, la reconnaissance de la multiplicité des fragments historiques et constructifs a constamment alimenté la réflexion autour des biens historiques. En effet, l'acceptation de cette complexité garantit la rigueur cognitive et la transmission de l'authenticité historique, tout en révélant la richesse des lieux et des pratiques des communautés qui les ont habités. Par ailleurs, elle constitue une véritable leçon intergénérationnelle permettant d'orienter les interventions futures en tant que composantes à parts entières du processus stratigraphique.

Développée à l'origine en géologie comme discipline dédiée à l'étude des couches constitutives de la croûte terrestre, la stratigraphie a été introduite en archéologie pour analyser l'ordre de formation des sites archéologiques —majoritairement enfouis— et pour enregistrer les strates retirées au cours des fouilles. Appliquée principalement lors des chantiers d'excavation, cette

méthode — considérée aujourd’hui comme l’état de l’art en matière d’analyse stratigraphique — a été transposée, à partir des années 1980, à l’étude du patrimoine bâti.

La méthode Harris s’est depuis, imposée comme un outil de référence pour l’analyse de la stratification architecturale. Elle a toutefois, fait l’objet de nombreuses études critiques, qui ont souligné l’incompatibilité de ses fondements théoriques à l’étude du bâti, le caractère originellement destructif de son approche, ainsi que ses limites en matière de représentation des séquences chronologiques, et d’interprétation des processus morphogénétiques des œuvres.

En outre, bien que de nouvelles procédures d’exploration des données architecturales —spatio-temporelles et morphologiques— aient vu le jour, les innovations méthodologiques pour l’étude de la stratification demeurent fragmentaires et ne permettent pas encore une mise à jour systématique de la méthode stratigraphique globale. L’analyse stratigraphique repose ainsi encore largement sur l’inspection visuelle, l’identification et la cartographie manuelles des unités, ainsi que sur l’utilisation de la chronologie relative issue de la matrice de Harris pour la structuration séquentielle.

C’est dans ce contexte que s’inscrit notre recherche, qui tend à aborder la stratification des bâtiments selon une approche non destructive et multidimensionnelle, à la fois spatiale, morphologique et temporelle. Nous proposons pour cela un flux de travail intégré et ad hoc, spécifiquement adapté aux biens architecturaux. Notre méthode s’appuie sur les avancées des technologies de l’information et de la communication (TIC) et exploite des modèles graphiques spatiaux et temporels enrichis, utilisés non seulement comme supports de représentation et de visualisation, mais aussi, comme véritables outils analytiques pour l’étude et l’interprétation des données stratigraphiques.

Notre objectif est d’optimiser l’utilisation des ressources disponibles afin d’assurer la production, la gestion, la visualisation et le partage d’informations, dans la perspective d’une compréhension globale et holistique des artefacts multicouches.

Après avoir identifié les exigences propres à l’étude stratigraphique en architecture et avoir analysé les limites de la méthode de Harris dans ce champ, nous avons élaboré un modèle conceptuel de la stratification architectural, pensé en termes d’entités physiques et chronologiques imbriquées. Ce modèle nous a permis d’établir la logique sous-jacente à notre intervention, en décrivant la stratification architecturale à travers ses composantes élémentaires et leurs relations structurantes.

Ainsi, la stratification peut être conçue comme la conséquence d'un processus diachronique générateur de la morphologie multicouche et de la spatialité complexes des œuvres bâties. Afin d'assurer l'adaptabilité et la compatibilité de notre approche avec les normes et avancées actuelles, nous nous sommes alignés aux modèles conceptuels de représentation et de documentation patrimoniale reconnus dans la sphère scientifique, tels que le CIDOC-CRM et ses extensions.

Nous avons ensuite, présenté les différentes étapes du flux de travail proposé : démarches d'acquisition et de collecte des données, méthodes de traitement et d'identification des concepts définis, et procédés de représentation et de visualisation des résultats. L'approche a été structurée sous la forme d'un système d'information stratigraphique intégrant l'ensemble du processus et des outils mobilisés.

Dans ce cadre, nous avons exploré le potentiel des modèles 3D réalistes comme support de représentation, d'inspection et d'extraction des données stratigraphiques, grâce aux technologies de capture de la réalité et de vision par ordinateur.

Par ailleurs, nous avons proposé une alternative à la matrice de Harris conventionnelle, en développant une frise chronologique multidimensionnelle permettant de visualiser à la fois les chronologies quantifiées et relatives des différentes unités physiques et temporelles définies. Cet outil a permis de mettre en évidence les permanences, les moments de transformation, ainsi que les intervalles de coexistence et de chevauchement entre les différentes unités de stratigraphiques et chronologiques du bâti.

Enfin, nous avons conçu une interface interactive et multimodale de visualisation, spécifiquement adaptée à la représentation simultanée des dimensions spatiales, morphologiques et temporelles, améliorant ainsi la lecture et la compréhension de la morphogenèse de l'artefact au fil du temps. Le prototype présenté prend en charge l'affichage et représentation interactive du modèle 3D, de la frise chronologique, et des données stratigraphiques non graphiques. Il permet la manipulation, la mise à jour, et la visualisation en temps réel des informations stratigraphique dans leur multidimensionnalité.

L'étude de cas menée sur la Zaouïa Sidi Rached de Constantine a mis en évidence les apports majeurs de notre approche pour l'analyse stratigraphique en architecture. Dans le processus proposé, les modèles 3D jouent un rôle central : non seulement comme outils de représentation pour la cartographie et la visualisation de la stratification, mais également comme instruments

d'analyse actifs. Ils permettent l'extraction, le traitement, l'interprétation et l'archivage des données stratigraphiques, enrichissant ainsi la compréhension du patrimoine bâti et contribuant à la production de connaissances. Le traitement automatisé, fondé sur les caractéristiques intrinsèques des modèles 3D, réduit la lenteur et la complexité traditionnelles des investigations stratigraphiques sur site, en particulier pour les bâtiments en maçonnerie de grande taille, et ouvre la voie à de nouvelles lectures et interprétations jusqu'alors indiscernables. Ces informations sont particulièrement précieuses pour les structures étendues et densément stratifiées. De plus, les modèles numériques favorisent l'interopérabilité, l'interactivité et la connectivité des données entre plateformes et outils, améliorant la collaboration et l'échange d'informations entre professionnels et disciplines du patrimoine.

Pour aborder la dimension temporelle, la frise chronologique introduite permet de séquencer efficacement les unités stratigraphiques. Elle facilite l'identification des permanences, des moments de transformation et des durées de vie de chaque composante stratigraphique, offrant une meilleure compréhension du processus évolutif du bâtiment.

Le point fort de la démarche réside dans l'intégration des dimensions spatiale, morphologique et temporelle au sein d'un outil ad hoc de visualisation multidimensionnelle. Grâce à une cartographie thématique par calques et à une navigation dynamique en 4D entre le modèle 3D et la frise chronologique, il devient possible d'appréhender la morphogenèse du bâtiment selon un processus de lecture rétrospective. Cette approche permet de visualiser les états intermédiaires du monument, d'enrichir la compréhension des causes de transformation et de dégradation, d'analyser les solutions architecturales adoptées et d'en cerner le comportement structurel apparent.

Le filtrage des données à travers les cartes thématiques, a permis de confirmer que la stratification architecturale n'obéit pas aux principes d'évolution gravitaire et d'assises horizontales définis dans la stratigraphie archéologique.

Ainsi, les contributions majeures de la démarche se manifestent principalement dans (voir figure.73) :

- La transition d'une lecture stratigraphique limitée aux coupes et élévations cumulatives en 2D vers une exploration spatiale tridimensionnelle enrichie ;
- Le passage d'une chronologie relative à une chronologie quantifiée ;
- Le développement d'une lecture multidimensionnelle et multimodale de la stratification

- La transformation d'un flux de travail fragmentaire à démarche morcelée en un processus intégré et interopérable, rassemblant les différentes sources de données mobilisées dans l'étude.

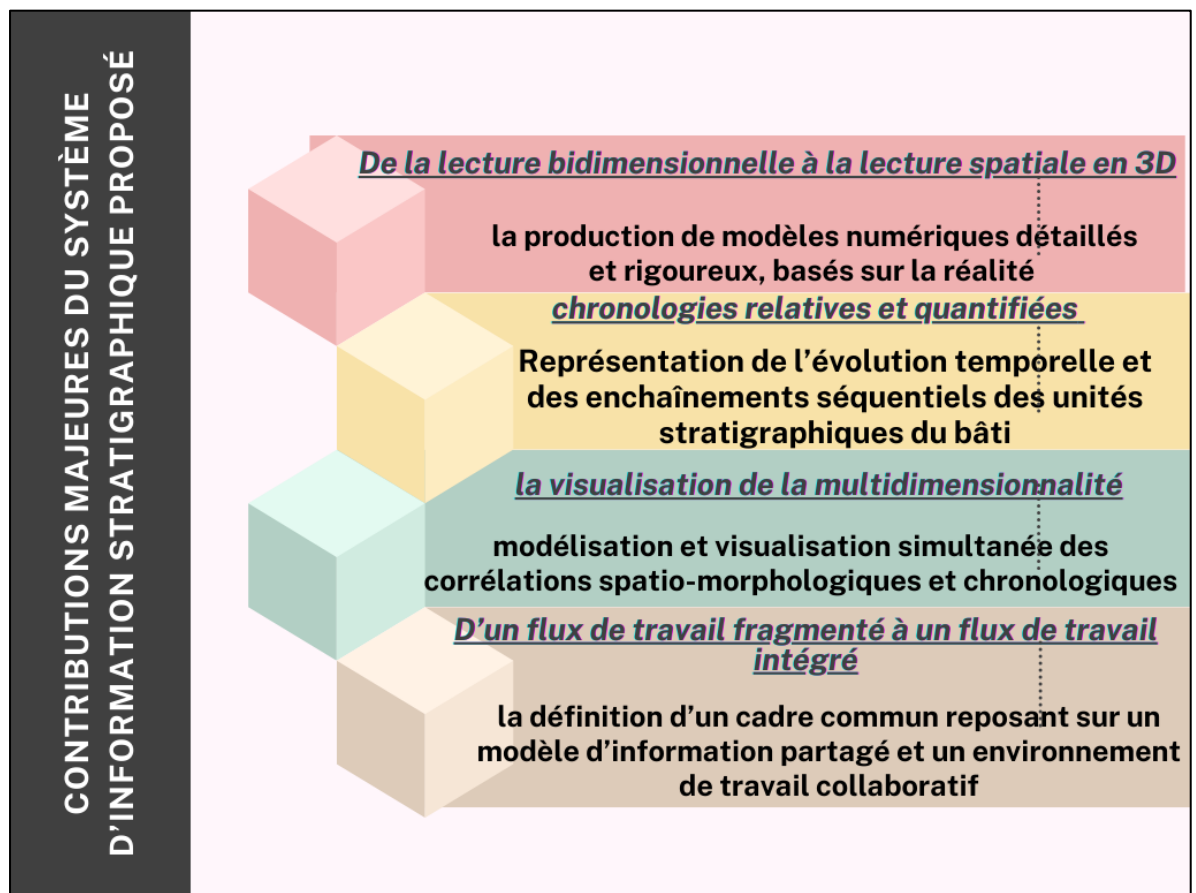


Figure 73: Aperçu des apports innovants du système d'information stratigraphique proposé.

Source : HAOUACHA et al. 2025

D'un point de vue pragmatique, l'approche stratigraphique proposée, soutient les reconstitutions hypothétiques des états passés, en rendant visualisables les étapes intermédiaires entre les différents cycles stratigraphiques définis.

Par ailleurs, une compréhension approfondie de la morphogenèse des bâtiments contribue directement à la planification de la conservation : elle facilite la reconnaissance des valeurs architecturales et culturelles à préserver, tout en permettant d'identifier les faiblesses et les causes de détérioration. En ce sens, la définition précise des relations topologiques et chronologiques entre les différents composants du bâtiment, offre une lecture claire de son comportement structurel et de son état physique, orientant ainsi, les choix d'intervention pour préserver à la fois la valeur matérielle et la portée sémantique des biens patrimoniaux.

La fiabilité de ces analyses dépend toutefois de la qualité des modèles 3D utilisés. Des difficultés telles que les occlusions, les éléments enduits et les zones fortement dégradées peuvent limiter la pertinence et la précision de l'analyse.

L'étude de cas menée sur la Zaouïa Sidi Rached a démontré l'efficacité de la méthode stratigraphique architecturale assistée numériquement pour appréhender la multidimensionnalité des œuvres diachroniques du patrimoine bâti de manière holistique. Néanmoins, une évaluation et une validation plus approfondies du processus proposé restent nécessaires. Des études expérimentales complémentaires devraient être menées sur diverses typologies et échelles de bâtiments, incluant les biens patrimoniaux modernes non maçonnés et les ensembles densément stratifiés. Cela permettra d'affiner les méthodes et outils proposés et de garantir leur adaptabilité et leur efficacité dans un large éventail de contextes patrimoniaux.

Par ailleurs, l'intégration de données complémentaires, telles que des informations sémantiques fonctionnelles ou typologiques, pathologiques ou encore techniques, pourrait enrichir la compréhension de la morphogenèse des artefacts et renforcer la planification de la conservation. L'utilisation d'une ontologie pour organiser et exploiter cette importante quantité d'informations offrirait un cadre cohérent et systématique, optimisant la valeur scientifique et opérationnelle des données collectées.

Tout en admettant les besoins d'amélioration et de développement soulevés, la méthode proposée dans ce travail constitue un cadre conceptuel et opérationnel pouvant assister les professionnels et chercheurs dans la compréhension de la genèse stratigraphique des œuvres du patrimoine architectural, tout en stimulant l'innovation dans l'utilisation des technologies numériques appliquées à l'architecture historique.

Elle se positionne enfin comme une alternative méthodologique et pragmatique à la méthode Harris, adaptée aux spécificités du champ architectural et du patrimoine bâti, où les logiques constructives, spatiales et matérielles requièrent une lecture plus contextualisée et multidimensionnelle des phénomènes stratigraphiques. La (figure. 74) illustre et synthétise les principaux apports et avancées réalisées dans cette recherche en matière de stratigraphie architecturale.

Utilisez le passé dans l'ensemble du texte car cela a été fait En intro le futur !

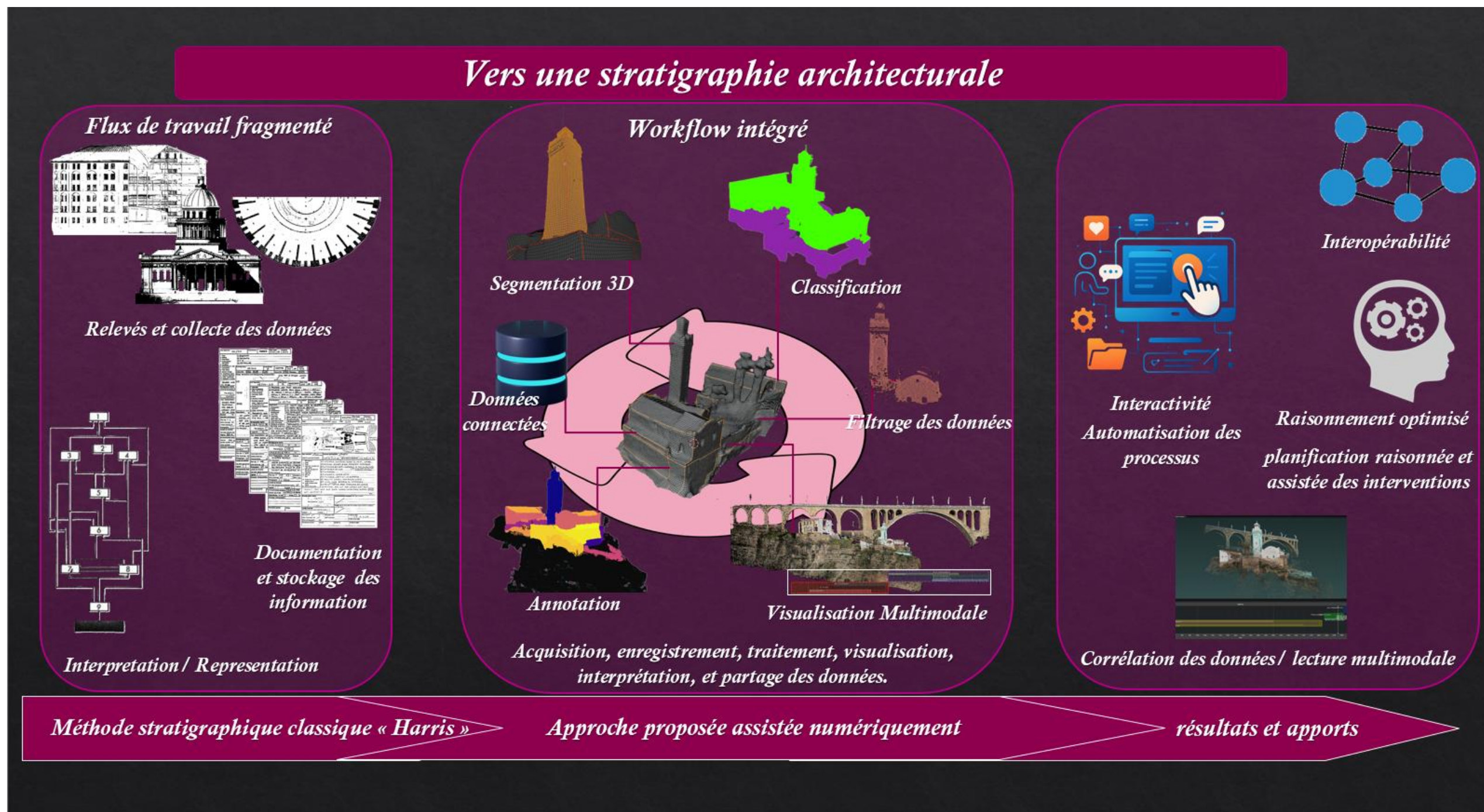


Figure 74: Schéma de synthèse des apports de la méthode proposée à la lecture stratigraphique du bâti.

Source : auteure

Bibliographie :

- 12e Assemblée Générale d'ICOMOS. 1999. *Charte du patrimoine bâti vernaculaire*. Mexique.
- Albourae, A. T., C. Armenakis, et M. Kyan. 2017. « ARCHITECTURAL HERITAGE VISUALIZATION USING INTERACTIVE TECHNOLOGIES ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W5 (août): 7-13. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-7-2017>.
- Alchermes, Joseph. 1994. « Spolia in Roman Cities of the Late Empire: Legislative Rationales and Architectural Reuse ». *Dumbarton Oaks Papers* 48: 167-78. <https://doi.org/10.2307/1291726>.
- ALI, M., et Sayed Magdi. 2016. *THE INFLUENCE OF SPOLIA ON ISLAMIC ARCHITECTURE*. <https://doi.org/10.2495/HA-V1-N3-334-343/007>.
- Ar, Bilge. 2015. « Spolia Usage in Anatolian Rulers: A Comparison of Ideas for Byzantines, Anatolian Seljuqs and Ottomans ». *A|Z ITU JOURNAL OF THE FACULTY OF ARCHITECTURE* 12 (2): 2. <https://www.az.itu.edu.tr/index.php/jfa/article/view/414>.
- Ardissone, P., L. Bornaz, G. Degattis, et R. Domaine. 2013. « A 3D INFORMATION SYSTEM FOR THE DOCUMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL EXCAVATIONS ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL-5/W2: 55-60. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-55-2013>.
- Arslan, C. Ceyhun. 2021. « Spolia and Textual Reincarnations: A Reassessment of the Hagia Sophia's History ». *Convivium: Exchanges and Interactions in the Arts of Medieval Europe, Byzantium, and the Mediterranean*, 1 janvier 2021. https://www.academia.edu/59341710/Spolia_and_Textual_Reincarnations_A_Reassessment_of_the_Hagia_Sophia_s_History.
- Artopoulos, Georgios, Paris Fokaides, Vasiliki Lysandrou, Marissia Deligiorgi, Panos Sabatakos, et Athos Agapiou. 2023. « Data-Driven Multi-Scale Study of Historic Urban Environments by Accessing Earth Observation and Non-Destructive Testing Information via an HBIM-Supported Platform ». *International Journal of Architectural Heritage*, 2 mai 2023, 1-20. <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2199408>.
- Associates, Robert McNeel & s. d. « Qu'est-ce que les NURBS? » www.rhino3d.com. Consulté le 8 octobre 2025. <https://www.rhino3d.com/features/nurbs/>.
- Australia ICOMOS. 1979. « The Burra Charter: The Australia ICOMOS Charter for the Conservation of Places of Cultural Significance ». Australia ICOMOS. <https://australia.icomos.org/publications/burra-charter-practice-notes/burra-charter-archival-documents/>.

- Banfi, F. 2017. « BIM ORIENTATION: GRADES OF GENERATION AND INFORMATION FOR DIFFERENT TYPE OF ANALYSIS AND MANAGEMENT PROCESS ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W5: 57-64. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-57-2017>.
- Banfi, Fabrizio. 2021. « The Evolution of Interactivity, Immersion and Interoperability in HBIM: Digital Model Uses, VR and AR for Built Cultural Heritage ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10 (10): 10. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100685>.
- Bekiari, Chrysoula, George Bruseker, Erin Canning, Martin Doerr, Philippe Michon, Christian-Emil Ore, Stephen Stead, et Athanasios Velios. 2024. *CIDOC_CRM Version 7.1.3*. ICOM.
- BERBRUGGER, Adrien. 1857. *journal des travaux de la société historique algérienne*. Revue africaine, N°4.
- Bestandjii, Siham. 2009. « Rites thérapeutiques et bien etre spiritue . Ancrages et résurgences.Pour un projet urbain de tourisme pèlerin. » Doctorat Urbanisme, Université Mentouri Constantine. <http://depot.umc.edu.dz/handle/123456789/7484>.
- Blaise, J Y, et I Dudek. 2008. *EXPERIMENTING TIMELINES FOR ARTEFACTS ANALYSIS: FROM TIME DISTRIBUTION TO INFORMATION VISUALISATION*. 2008.
- Brogiolo, Gian Pietro. 1988. « Archeologia dell'Edilizia Storica ». Studocu. <https://www.studocu.com/it/document/universita-degli-studi-di-firenze/archeologia-medievale/brogiolo-1988-archeologia-delledilizia-storica/110098034>.
- . 2007. *Dall'Archeologia dell'architettura all'Archeologia della complessità*. 1.
- Brusaporci, Stefano, et Pamela Maiezza. 2016. *RE-LOADING BIM: BETWEEN SPATIAL AND DATABASE INFORMATION MODELING FOR ARCHITECTURAL HERITAGE DOCUMENTATION*.
- Brusaporci, Stefano, Ilaria Trizio, Gianfranco Ruggeri, Pamela Maiezza, Alessandra Tata, et Alessandro Giannangeli. 2018. « AHBIM per l'analisi Stratigrafica Dell'architettura Storica. » *Restauro Archeologico*, 3 juillet 2018, 112-131 Pages. 112-131 Pages. <https://doi.org/10.13128/RA-23463>.
- Busayarat, Chawee. 2010. « La maquette numérique comme support pour la recherche visuelle d'informations patrimoniales : définition d'une approche pour la sémantisation de sources iconographiques par référencement spatial. » Phdthesis, Arts et Métiers ParisTech. <https://pastel.hal.science/pastel-00557514>.

- Campisi, Maria Teresa, S. Giuliano, et Mariangela Liuzzo. 2019. « 3D INTEGRATED SURVEYS AND STRATIGRAPHIC METHODS FOR A DEEPER UNDERSTANDING OF HISTORICAL BUILDINGS. A CASE-STUDY OF THE FRANCISCAN MONASTERY AND THE IMMACOLATA CHURCH IN TROINA, SICILY ». *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W11 (mai): 345-52. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-345-2019>.
- Choay, Françoise. 1996. *L'Allégorie du patrimoine*. Seuil.
- Christaki, Eleni, Martin Doerr, Achille Felicetti, Sorin Hermon, Gerald Hiebel, Athina Kritsotaki, Anja Masur, et al. 2023. *CRMarcheo*. Italy: University of Florence.
- Christian, Kathleen. 2010. « Empire without End: Antiquities Collections in Renaissance Rome, c. 1350-1527 ». *Yale University Press. New Haven and London*, 2010.
https://www.academia.edu/1752231/Empire_without_End_Antiquities_Collections_in_Renaissance_Rome_c_1350_1527_2010_.
- Cuttoli, P. 1915. « La Dépêche de Constantine : journal politique quotidien ». Gallica, décembre 9. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bd6t51165905s>.
- Cytryn, Katia. 2009. « The Umayyad Mosque of Tiberias ». *Muqarnas Online* 26 (janvier): 37-61. <https://doi.org/10.1163/22118993-90000143>.
- Davies, Martin. 1987. « The Archaeology of Standing Structures ». *The Australian Journal of Historical Archaeology*, v. 5 (1987) 5.
- Del Giglio, All'Insegna, R Prenti, et R Francovich. 1988. *Archeologia Medievale*, XV, 1988. All'Insegna del Giglio.
- Demetrescu, Emanuel. 2015. « Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice ». *Journal of Archaeological Science* 57: 42-55. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.02.004>.
- . 2018. « Virtual Reconstruction as a Scientific Tool: The Extended Matrix and Source-Based Modelling Approach ». In *Digital Research and Education in Architectural Heritage*, édité par Sander Münster, Kristina Friedrichs, Florian Niebling, et Agnieszka Seidel-Grzesińska, 102-16. Dresden, Germany: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76992-9_7.
- Desachy, Bruno. 2008a. « De la formalisation du traitement des données stratigraphiques en archéologie de terrain ». Phdthesis, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I. <https://theses.hal.science/tel-00406241>.
- . 2008b. « Le Stratifiant, un outil de traitement des données stratigraphiques ». *Archeologia e Calcolatori* n. XIX- 2008, janvier 2008.

- Diara, F., et F. Rinaudo. 2020. « BUILDING ARCHAEOLOGY DOCUMENTATION AND ANALYSIS THROUGH OPEN SOURCE HBIM SOLUTIONS VIA NURBS MODELLING ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLIII-B2-2020 (août): 1381-88. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1381-2020>.
- Discamps, Emmanuel, Marc Thomas, Christelle Dancette, Brad Gravina, Sébastien Plutniak, Aurélien Royer, Alexandre Angelin, et al. 2023. « Breaking Free from Field Layers: The Interest of Post-Excavation Stratigraphies (PES) for Producing Reliable Archaeological Interpretations and Increasing Chronological Resolution ». *Journal of Paleolithic Archaeology* 6 (1): 29. <https://doi.org/10.1007/s41982-023-00155-x>.
- Djebbali, abderrazek, réal. 2023. *بيت من بيوت الله. مسجد « سيدي راشد » في قسنطينة*. Constantine. <https://youtu.be/Kk6QXlbex3U?si=UXJsxUec7SANTLcS>.
- Doerr, Martin, Athina Kritsotaki, Yannis Rousakis, Gerald Hiebel, Maria Theodoridou, et Athanasios Velios. 2023. *CRMsci Version 2.1*. Greece: Foundation for Research and Technology – Hellas.
- Doglioni, Francesco. 1997. *Stratigrafia e restauro : tra conoscenza e conservazione dell'architettura / Francesco Doglioni ; presentazione di Paolo B. Torsello ; contributi di M. Ciarocchi ... [et al.]*. Idee, strumenti ed esperienze per il restauro. Trieste: LINT.
- Dudek, Iwona, et Jean-Yves Blaise. 2010. « UNDERSTANDING CHANGES IN HERITAGE ARCHITECTURE ». *Proceedings IMAGAPP/IVAPP 2010*, 17 mai 2010.
- . 2020. « Diachrograms – a Theoretical Framework for the Modelling and Analysis of a Heritage Artefact's Diachronic Evolution. » <https://shs.hal.science/halshs-03070375>.
- Dumser, Elisha Ann. 2018. « Visual Literacy and Reuse in the Architecture of Late Imperial Rome ». In *Reuse and Renovation in Roman Material Culture*, 1^{re} éd., édité par Diana Y. Ng et Molly Swetnam-Burland, 140-59. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108582513.006>.
- Eravşar, Osman. 2017. « Spolia in Seljuk Buildings ». In *Proceedings of the 18th Symposium on Mediterranean Archaeology*, 167-82. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1zcm1f1.23>.
- Viollet-Le-Duc, Viollet-le-Duc. 1858. « Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^{ème} au XVI^{ème} siècle. Tome premier : AB - ARO ». Avec B. Bance. Bibliothèque de l'Institut National d'Histoire de l'Art, collections Jacques Doucet, janvier 1. <http://bibliotheque-numerique.inha.fr/idurl/1/15484>.
- . 1866. « Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^{ème} au XVI^{ème} siècle. Tome huitième : QU - SY ». Avec A. Morel. Bibliothèque de l'Institut

- National d'Histoire de l'Art, collections Jacques Doucet, janvier 1.
<http://bibliotheque-numerique.inha.fr/idurl/1/15492>.
- Ferdani, Daniele, Emanuel Demetrescu, Marco Cavalieri, Gloriana Pace, et Sara Lenzi. 2020. *3D Modelling and Visualization in Field Archaeology. From Survey To Interpretation Of The Past Using Digital Technologies*. 4 avril 2020, 20.
<https://doi.org/10.12977/groma26>.
- Forster, A., E. Valero, F. Bosché, E. Hyslop, et L. Wilson. 2023. « Digital Toolkit to Assist the Interpretation of Traditional Masonry Construction ». *International Journal of Architectural Heritage*, 6 mars 2023, 1-15.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2182729>.
- Frankl, Paul. 2000. *Gothic Architecture*. Avec Internet Archive. New Haven : Yale University Press. <http://archive.org/details/gothicarchitectu0000fran>.
- Genovez, Sarita Carneiro. 2012. « Análise Estratigráfica: Uma Contribuição Ao Projeto De Restauro ». University of São Paulo. <https://doi.org/10.11606/d.16.2012.tde-20062012-161333>.
- Grégoire, Henri (1750-1831) Auteur du texte. 1794. *Rapport sur les destructions opérées par le Vandalisme, et sur les moyens de le réprimer . Par Grégoire, séance du 14 Fructidor, l'an second de la République une et indivisible, suivi du Décret de la Convention nationale. Imprimés et envoyés par ordre de la Convention nationale aux Administrations et aux Sociétés populaires*.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b10538180d>.
- GRELL, Chantal. 1982. « Lettre de Pline le jeune à Tacite, dans laquelle il raconte l'éruption du Vésuve et la mort de son oncle ». In *Herculanum et Pompéi dans les récits des voyageurs français du xviii^e siècle*, 207-9. Publications du Centre Jean Bérard. <https://doi.org/10.4000/books.pcbj.233>.
- Grilli, E., D. Dininno, G. Petrucci, et F. Remondino. 2018. « FROM 2D TO 3D SUPERVISED SEGMENTATION AND CLASSIFICATION FOR CULTURAL HERITAGE APPLICATIONS ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2* (mai): 399-406. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-399-2018>.
- Grilli, Eleonora, Domenica Dininno, Lucia Marsicano, Giulio Petrucci, et Fabio Remondino. 2018. « Supervised Segmentation of 3D Cultural Heritage ». *2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) Held Jointly with 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018)*, octobre 2018, 1-8.
<https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2018.8810107>.
- Griwodz, Carsten, Simone Gasparini, Lilian Calvet, Pierre Gurdjos, Fabien Castan, Benoit Maujean, Gregoire De Lillo, et Yann Lanthony. 2021. « AliceVision Meshroom: An Open-Source 3D Reconstruction Pipeline ». *Proceedings of the*

12th ACM Multimedia Systems Conference, 24 juin 2021, 241-47.
<https://doi.org/10.1145/3458305.3478443>.

Guiglia, Alessandra, et Claudia Barsanti. 2019. « Spolia in Constantinople's Hagia Sophia from the Age of Justinian to the Ottoman Period. The Phenomenon of Multilayered Reuse ». *SPOLIA REINCARNATED Afterlives of Objects, Materials, and Spaces in Anatolia from Antiquity to the Ottoman Era, 10 Th International ANAMED Annual Symposium*, Ed. by Ivana Jevtic, Susan Yalman, 1 janvier 2019.
https://www.academia.edu/43357220/Alessandra_Guiglia_Claudia_Barsanti_Spolia_in_Constantinoples_Hagia_Sophia_from_the_Age_of_Justinian_to_the_Ottoman_Period_The_Phenomenon_of_Multilayered_Reuse.

Guney, Yasemin Ince. 2007. « Type and typology in architectural discourse ». *Journal of Balikesir University FBE* 9 (juillet): 3-18.

Ham, Namhyuk, Baek-Il Bae, et Ok-Kyung Yuh. 2020. « Phased Reverse Engineering Framework for Sustainable Cultural Heritage Archives Using Laser Scanning and BIM: The Case of the Hwanggungwoo (Seoul, Korea) ». *Sustainability* 12 (19): 8108. <https://doi.org/10.3390/su12198108>.

HAOUACHA, Ferial. 2015. « L'ETUDE DE LA STRATIFICATION ARCHITECTURALE DANS LES MONUMENTS HISTORIQUES PONT EL KANTARA DE CONSTANTINE ». Magister thesis, BADJI MOKHTAR ANNABA University. <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2019/02/These-Haouacha-Ferial.pdf>.

Haouacha, Ferial, Joris Ravaglia, et Khédidja Boufenara. 2025. « A Stratigraphic Information System for the Study of Architectural Heritage Assets' Morphogenesis ». *International Journal of Architectural Heritage*, 2025, 1-22. <https://doi.org/10.1080/15583058.2025.2492239>.

Harris, Edward C. 1989. *Principles of Archaeological Stratigraphy*. 2nd edition. London San Diego: Academic Press.

Harris, Edward Cecil. 2017. « Harris Matrices and the Stratigraphic Record ». In *Encyclopedia of Geoarchaeology*, édité par Allan S. Gilbert, 403-10. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4409-0_7.

Herzog, Irmela. 2004. « Group and Conquer-a Method for Displaying Large Stratigraphic Data Sets ». *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 1 janvier 2004. https://www.academia.edu/1440221/Group_and_Conquer_a_Method_for_Displaying_Large_Stratigraphic_Data_Sets.

Hoggett, Richard, Sedgeford Historical and Archaeological Research. 2000. *Principles and Practice: The Application of the Harris Matrix to Standing Building Recording*. Unpublished BA Dissertation, University of Bristol. 2000. https://www.academia.edu/1936177/Hoggett_R_2000_Principles_and_Practice_

The_Application_of_the_Harris_Matrix_to_Standing_Building_Recording_Unpublished_BA_dissertation_University_of_Bristol.

- Hundack, Christoph, Petra Mutzel, Igor Pouchkarev, et Stefan Thome. 1998. « ArchE: A Graph Drawing System for Archaeology ». *Graph Drawing*, publication en ligne anticipée, 11 avril 1998. https://doi.org/10.1007/3-540-63938-1_72.
- Ibn Qunfudh al-Qusanṭīnī, Ahmad ibn al-Hasan. 1968. *كتاب الفارسية في مبادئ الدولة الحفصية 2*. <http://archive.org/details/Al-farissiya>.
- ICOMOS. 1964. *Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites (Charte de Venise)*. Venise: ICOMOS. https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/venice_f.pdf.
- . éd. 1990. *Guide to Recording Historic Buildings*. 1. publ. London: Butterworth Architecture.
- . 2007. *Charte ICOMOS pour l'interprétation et la présentation des sites culturels patrimoniaux*. Québec: ICOMOS. https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/interpretation_f.pdf.
- . 2011. « Principes de La Valette pour la gestion et l'interprétation du patrimoine archéologique ». La Valette, Malte: Conseil International des Monuments et des Sites (ICOMOS). https://civvih.icomos.org/wp-content/uploads/2022/03/Valetta-Principles-GA-_EN_FR_28_11_2011.pdf.
- Idrīsī, Muḥammad ibn Muḥammad al-Šarīf Abū ‘Abd Allāh al. 1250. « Nuzhat al-muštāq fī iḥtirāq al-āfāq. » Manuscript. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b6000547t>.
- Jokilehto, J. 1999. *A History of Architectural Conservation*. Butterworth series on conservation in the arts, archaeology and architecture. Butterworth-Heinemann. <https://books.google.dz/books?id=3sDEQgAACAAJ>.
- Katsianis, Markos, Kostas Kotsakis, et Filippos Stefanou. 2021. « Reconfiguring the 3D excavation archive. Technological shift and data remix in the archaeological project of Paliambela Kolindros, Greece ». *Journal of Archaeological Science: Reports* 36: 102857. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102857>.
- Katsianis, Markos, Spyros Tsipidis, Kostas Kotsakis, et Alexandra Kousoulakou. 2008. « A 3D digital workflow for archaeological intra-site research using GIS ». *Journal of Archaeological Science* 35 (3): 655-67. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.06.002>.
- Kinney, D. 2011. « Ancient Gems in the Middle Ages: Riches and Ready-mades ». In *Reuse value: Spolia and appropriation in art and architecture from Constantine to Sherrie Levine*, lic. https://www.researchgate.net/publication/291174530_Reuse_value_Spolia_and_appropriation_in_art_and_architecture_from_Constantine_to_Sherrie_Levine.

- Kinney, Dale. 2001. « Roman Architectural Spolia ». *Proceedings of the American Philosophical Society* 145 (2): 138-61. <https://www.jstor.org/stable/1558268>.
- . 2018. « The Paradigm of Spolia ». *Mittelalterliche Mythenrezeption. Paradigmen und Paradigmenwechsel*, 1 janvier 2018, 173-264. http://www.boehlav-verlag.com/Sensus_Studien_zur_mittelalterlichen_Kunst.htm.
- Kissous, Samuel, réal. 2020. *ancient superstructures: istanbul's Hagia Sophia*. Documentaire. Pernal media. <https://www.youtube.com/watch?v=qM6hWEZbeu8&t=1786s>.
- Koortbojian, Michael. 2011. « Renaissance Spolia and Renaissance Antiquity (One Neighborhood, Three Cases) ». In *Reuse Value*, 149-65. United Kingdom: Ashgate Publishing Ltd.
- L. Féraud, Société historique algérienne. 1868. « LES ANCIENS ÉTABLISSEMENTS RELIGIEUX MUSULMANS DE CONSTANTINE ». *Revue africaine : journal des travaux de la Société historique algérienne*, 1 mars 1868. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56979718>.
- Laurent, Beatrice St. 2022. « Spolia -A Conscious Display of History in Seventh-Century Jerusalem ». *Jerusalem Quarterly* 91, 1 janvier 2022. https://www.academia.edu/96897632/Spolia_A_Conscious_Display_of_History_in_Seventh_Century_Jerusalem.
- LAYT, John, et Recording Archaeology, réal. 2016. *The Matrix Reloaded: Explorations in Directed Acyclic Graphs*. 21:55. <https://www.youtube.com/watch?v=geLD7Fo6crU>.
- Lerario, Antonella. 2022. « The Role of Built Heritage for Sustainable Development Goals: From Statement to Action ». *Heritage* 5 (3): 2444-63. <https://doi.org/10.3390/heritage5030127>.
- Lic, Agnieszka. 2013. « Functions of Spolia in Umayyad Architecture ». *Art of the Orient* 2: 7-18. <https://doi.org/10.15804/aoto201301>.
- Logothetis, Sotiris, A. Delinasiou, et E. Stylianidis. 2015. « Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review ». *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-5/W3 (août): 177-83. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015>.
- Macher, H., P. Grussenmeyer, T. Landes, G. Halin, C. Chevrier, et O. Huyghe. 2017. « PHOTOGAMMETRIC RECORDING AND RECONSTRUCTION OF TOWN SCALE MODELS – THE CASE OF THE PLAN-RELIEF OF STRASBOURG ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W5 (août): 489-95. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-489-2017>.

- Malinverni, E. S., R. Pierdicca, M. Paolanti, M. Martini, C. Morbidoni, F. Matrone, et A. Lingua. 2019. « DEEP LEARNING FOR SEMANTIC SEGMENTATION OF 3D POINT CLOUD ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W15 (août): 735-42. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-735-2019>.
- Mammoli, Raissa, Chiara Mariotti, et Ramona Quattrini. 2021. « Modeling the Fourth Dimension of Architectural Heritage: Enabling Processes for a Sustainable Conservation ». *Sustainability* 13 (mai): 5173. <https://doi.org/10.3390/su13095173>.
- Manuel, Adeline, et Violette Abergel. 2022. « Aïoli, a Reality-Based Annotation Cloud Platform for the Collaborative Documentation of Cultural Heritage Artefacts ». Article de colloque presented sur Un patrimoine pour l'avenir, une science pour le patrimoine. 15 mars 2022. <https://hal.science/hal-03819923>.
- Manuel, Adeline, Livio Luca, et Philippe Véron. 2014. « A Hybrid Approach for the Semantic Annotation of Spatially Oriented Images ». *International Journal of Heritage in the Digital Era* 3 (juin): 305-20. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.3.2.305>.
- Mathews, Karen. 2015. « Decorating with Things: Spolia as Material Culture in the Italian Maritime Republics, 1100–1300, Bfo-Journal 1 ». *Bfo-Journal*, Copy-Paste. The Reuse of Material and Visual Culture in Architecture, 1.2015. https://www.academia.edu/35829082/Decorating_with_Things_Spolia_as_Material_Culture_in_the_Italian_Maritime_Republics_1100_1300_bfo_Journal_1_2015_.
- May, Keith. 2020. « The Matrix: Connecting Time and Space in Archaeological Stratigraphic Records and Archives ». *Internet Archaeology*, publication en ligne anticipée, 29 septembre 2020. <https://doi.org/10.11141/ia.55.8>.
- Mcclary, Richard. 2015. « The Re-Use of Byzantine Spolia in Rūm Saljūq Architecture ». *Bfo-Journal*, Copy-Paste. The Reuse of Material and Visual Culture in Architecture, 1.2015 (décembre): 13-22. <https://www.research.ed.ac.uk/en/publications/the-re-use-of-byzantine-spolia-in-r%C5%ABm-salj%C5%ABq-architecture>.
- Mercier, Ernest. 1903. *Histoire de Constantine*. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5735219v>.
- Messaoudi, Tommy. 2017. « Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spatialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine culturel bâti ». PhD Thesis, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM. <https://theses.hal.science/tel-01628391/>.
- Messaoudi, Tommy, Philippe Véron, Gilles Halin, et Livio De Luca. 2018. « An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building

- conservation state ». *Journal of Cultural Heritage* 29 (janvier): 100-112.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.017>.
- Muhammad al-Wazzan al-Fassi, Léon l'Africain al-Hasan ibn. 1896. *Description de l'Afrique : tierce partie du monde. Volume 2*.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6536359r>.
- Murtiyoso, Arnadi, Eugenio Pellis, Pierre Grussenmeyer, Tania Landes, et Andrea Masiero. 2022. « Towards Semantic Photogrammetry: Generating Semantically Rich Point Clouds from Architectural Close-Range Photogrammetry ». *Sensors* 22 (3): 966. <https://doi.org/10.3390/s22030966>.
- Néroulidis, Ariane, Thomas Pouyet, Sarah Tournon, Miled Rousset, Marco Callieri, Adeline Manuel, Violette Abergel, et al. 2024. « A digital platform for the centralization and long-term preservation of multidisciplinary scientific data belonging to the Notre Dame de Paris scientific action ». *Journal of Cultural Heritage*, Notre-Dame de Paris : a multidisciplinary scientific site, vol. 65 (janvier): 210-20. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.09.016>.
- Neubauer, Wolfgang, Christoph Traxler, Andreas Lenzhofer, et Matthias Kucera. 2018. « Integrated Spatio-Temporal Documentation and Analysis of Archaeological Stratifications Using the Harris Matrix ». *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, 2018, 5 pages. 5 pages.
<https://doi.org/10.2312/GCH.20181369>.
- Neumeier, Emily, et Ivana Jevtić. 2019. « Review: Spolia Reincarnated, Edited by Ivana Jevtic and Suzan Yalman ». *YILLIK: Annual of Istanbul Studies*, 1 janvier 2019.
https://www.academia.edu/41442984/Review_Spolia_Reincarnated_edited_by_Ivana_Jevtic_and_Suzan_Yalman.
- Nguyen, Anh, et Bac Le. 2013. « 3D point cloud segmentation: A survey ». *2013 6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, 2013, 225-30. <https://doi.org/10.1109/RAM.2013.6758588>.
- Nieto Julián, Juan, et J. Moyano campos. 2014. « The paramental study on the Model of Information of Historic Building or “HBIM Project” ». *Virtual Archaeology Review VAR VOL 5*, N° 11 (novembre): 73-85.
- Niewöhner, Philipp. 2019. « Varietas, spolia, and the end of Antiquity in East and West ». In *Spolia reincarnated. Afterlives of objects, materials and spaces*, 237-57.
- Ortega-Alvarado, Lidia M., Ángel-Luis García-Fernández, Francisco Conde-Rodríguez, et Juan M. Jurado-Rodríguez. 2022. « Integrated and Interactive 4D System for Archaeological Stratigraphy ». *Archaeological and Anthropological Sciences* 14 (10): 203. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01667-3>.
- Pamart, A., F. Morlet, et L. De Luca. 2019. « A FULLY AUTOMATED INCREMENTAL PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING DEDICATED FOR

- COLLABORATIVE REMOTE-COMPUTING WORKFLOW ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W9 (janvier): 565-71.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-565-2019>.
- Papaleo, Laura, et Leila De Floriani. 2010. « Manual Segmentation and Semantic-Based Hierarchical Tagging of 3D Models ». *Eurographics Italian Chapter Conference 2010*, 2010, 8 pages. 8 pages.
<https://doi.org/10.2312/LOCALCHAPTEREVENTS/ITALCHAP/ITALIANCHAPCONF2010/025-032>.
- Park, Jisoo, et Yong Cho. 2021. « Laser Intensity-Assisted Construction Material Classification in Point Cloud Data Using Deep Learning ». septembre 2021.
<https://doi.org/10.1061/9780784483893.001>.
- Pellis, E., A. Masiero, G. Tucci, M. Betti, et P. Grussenmeyer. 2021. « ASSEMBLING AN IMAGE AND POINT CLOUD DATASET FOR HERITAGE BUILDING SEMANTIC SEGMENTATION ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLVI-M-1-2021 (août): 539-46. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-539-2021>.
- Pepe, Massimiliano, Domenica Costantino, Vincenzo Saverio Alfio, Alfredo Garofalo Restuccia, et Nicola Massimiliano Papalino. 2021. « Scan to BIM for the Digital Management and Representation in 3D GIS Environment of Cultural Heritage Site ». *Journal of Cultural Heritage* 50 (juillet): 115-25.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.05.006>.
- Petrillo, J. 2019. « Pompeii & Herculaneum Archaeological Sites: Conservation and Management ». Masters, Canterbury Christ Church University.
<https://repository.canterbury.ac.uk/item/8v09z/pompeii-herculaneum-archaeological-sites-conservation-and-management>.
- Pili, Alessandra. 2019. « BIM PROCESS, ONTOLOGIES AND INTERCHANGE PLATFORM FOR CULTURAL ARCHITECTURAL HERITAGE MANAGEMENT: STATE OF ART AND DEVELOPMENT PERSPECTIVES ». *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W11 (mai): 969-73.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-969-2019>.
- Playfair, R. Lambert (Robert Lambert). 1877. *Travels in the Footsteps of Bruce in Algeria and Tunis : Illustrated by Facsimiles of His Original Drawings*. Avec Getty Research Institute. London : C. Kegan Paul.
<http://archive.org/details/travelsinfootste00play>.
- Ravoisié, Amable. 1846. *Exploration Scientifique de l'Algérie. Beaux-Arts, Architecture et Sculpture. t. 3 / Par Amable Ravoisié...*
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k859565t>.

- Remondino, Fabio, Stefano Girardi, Alessandro Rizzi, et Lorenzo Gonzo. 2009. « 3D modeling of complex and detailed cultural heritage using multi-resolution data ». *J. Comput. Cult. Herit.* (New York, NY, USA) 2 (1). <https://doi.org/10.1145/1551676.1551678>.
- République Algérienne Démocratique et Populaire. 2005. « Décret exécutif n° 05-208 du 26 Rabie Ethani 1426 (4 juin 2005) portant création et délimitation du secteur sauvegardé de la vieille ville de Constantine ». <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2005/F2005039.pdf>.
- Rodríguez-Gonzálvez, Pablo, Ángel Campo, Ángel Muñoz-Nieto, Luis Sánchez-Aparicio, et Diego González-Aguilera. 2019. « Diachronic Reconstruction and Visualization of Lost Cultural Heritage Sites ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8 (janvier): 61. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020061>.
- Ronzino, Paola, Franco Niccolucci, Achille Felicetti, et Martin Doerr. 2016. *CRMba*. Italy: Polo Universitario "Città di Prato".
- Roskams, Steve. 2020. « The Post-Excavation Analysis and Archiving of Outputs from Complex, Multi-Period Landscape Investigations: The Example of Heslington East, York ». *Internet Archaeology*, n° 55 (septembre). <https://doi.org/10.11141/ia.55.7>.
- Ruskin, John. 1889. *The Seven Lamps of Architecture*. Avec University of California Libraries. Sunnyside [Eng.] : G. Allen. <http://archive.org/details/lampsofarchseven00ruskrich>.
- Rüther, Heinz, Roshan Bhurtha, Christoph Held, Ralph Schröder, et Stephen Wessels. 2012. « Laser scanning in heritage documentation: The scanning pipeline and its challenges ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 78 (avril): 309-16. <https://doi.org/10.14358/PERS.78.4.309>.
- Santoni, Arianna, Rafael Martín-Talaverano, Ramona Quattrini, et José Ignacio Murillo-Fragero. 2021. « HBIM Approach to Implement the Historical and Constructive Knowledge. The Case of the Real Colegiata of San Isidoro (León, Spain) ». *Virtual Archaeology Review* 12 (24): 49. <https://doi.org/10.4995/var.2021.13661>.
- Schönberger, Johannes. s. d. *(Crowdsourced) Image-Based 3D Modeling*.
- Shamir, Ariel. 2008. « A Survey on Mesh Segmentation Techniques ». *Computer Graphics Forum* 27 (6): 1539-56. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01103.x>.
- Shaw, Thomas (1694-1751) Auteur du texte. 1738. *Travels, or Observations Relating to Seveal Parts of Barbary and the Levant, by Thomas Shaw...* <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b52505957p>.

- Société archéologique de Constantine. 1907. « Recueil des notices et mémoires de la Société archéologique de la province de Constantine ». Gallica.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k54570720>.
- « Spolia Reincarnated: Afterlives of Objects, Materials, and Spaces in Anatolia from Antiquity to the Ottoman Era, Ed. I. Jevtić and S. Yalman (Istanbul: ANAMED, 2018). » 2018. *Proceedings*, 10th International Symposium of the Research Center for Anatolian Civilizations, 1 janvier 2018.
- Stathopoulou, E.-K., et F. Remondino. 2019. « SEMANTIC PHOTOGRAMMETRY – BOOSTING IMAGE-BASED 3D RECONSTRUCTION WITH SEMANTIC LABELING ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W9* (janvier): 685-90.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-685-2019>.
- Stawniak, Mirosław, Krzysztof Walczak, et Bogdan Bobowski. 2005. « Dynamic 3D Visualisation of Harris Matrix Data ». In *Virtual Retrospect 2005*, édité par Robert Vergnien et Caroline Delevoie, 2:67-72. Archeovision. Biarritz, France: Ausonius. <https://hal.science/hal-01759198>.
- Stefani, Chiara. 2007. *MAQUETTES NUMERIQUES SPATIO-TEMPORELLES D'EDIFICES PATRIMONIAUX: UNE APPROCHE POUR LA MODELISATION DE LA DIMENSION TEMPORELLE*. 2007.
- Stefani, Chiara, Livio Luca, Philippe Véron, et Michel Florenzano. 2009. « Time indeterminacy and spatio-temporal building transformations: An approach for architectural heritage understanding ». *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 4 (février): 61-74.
<https://doi.org/10.1007/s12008-009-0085-5>.
- Stenhouse, William. 2017. « From Spolia to Collections in the Roman Renaissance ». In *Perspektiven der Spolienforschung 2: Zentren und Konjunkturen der Spolierung*, édité par Stefan Altekamp, Carmen Marcks-Jacobs, et Peter Seiler, 381-404. Humboldt-Universität zu Berlin, Exzellenzcluster 264 Topoi.
<http://dx.doi.org/10.18452/5361>.
- Stojakovic, V., et I. Bajsanski. 2013. « IMAGE-BASED SURVEYING AND MODELING OF THE UNPROTECTED ARCHITECTURAL HERITAGE – ST. RUDOLF'S CHURCH IN BANOSTOR ». *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5/W1* (juillet): 295-300. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-295-2013>.
- Stone, Sally. 2019. *UnDoing Buildings: Adaptive Reuse and Cultural Memory*.
<https://doi.org/10.4324/9781315397221>.
- Sužiedelytė-Visockienė, Jūratė, Renata Bagdžiūnaitė, Naglis Malys, et Vida Maliene. 2015. « Close-range photogrammetry enables documentation of environment-induced deformation of architectural heritage ». *Environmental engineering and*

- management journal* 14 (juillet): 1371-81.
<https://doi.org/10.30638/eemj.2015.149>.
- Tanguay, Mathieu. 2012. *Conserver ou restaurer? La dialectique de l'œuvre architecturale : histoire d'un débat qui a contribué à la formation de la culture de la conservation du patrimoine bâti*. 4 septembre 2012.
<https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/8569>.
- . 2013. *Conserver ou restaurer? La dialectique de l'oeuvre architecturale: histoire d'un debat qui a contribue a la formation de la culture de la conservation du patrimoine bati*. Library and Archives Canada = Bibliothèque et Archives Canada.
- Taylor, James, et Keith May. 2024. « Resurrecting, reinterpreting and reusing stratigraphy: an afterlife for archaeological data ». *Antiquity*, 18 avril 2024, 1-16.
<https://doi.org/10.15184/aqy.2024.60>.
- Traxler, Christoph, et Wolfgang Neubauer. 2009. « The Harris Matrix Composer - A New Tool to Manage Archaeological Stratigraphy ». 1 janvier 2009.
- Trizio, I., A. Marra, F. Savini, et G. Fabbrocino. 2021. « SURVEY METHODOLOGIES AND 3D MODELLING FOR CONSERVATION OF HISTORICAL MASONRY BRIDGES ». *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* VIII-M-1-2021 (août): 163-70. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-VIII-M-1-2021-163-2021>.
- Vacca, Giuseppina, Donatella Rita Fiorino, et Davide Pili. 2018. « A Spatial Information System (SIS) for the Architectural and Cultural Heritage of Sardinia (Italy) ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7 (2): 2.
<https://doi.org/10.3390/ijgi7020049>.
- Vandenabeele, Louis, Dimitrios Loverdos, Marius Pfister, et Vasilis Sarhosis. 2023. « Deep Learning for the Segmentation of Large-Scale Surveys of Historic Masonry: A New Tool for Building Archaeology Applied at the Basilica of St Anthony in Padua ». *International Journal of Architectural Heritage*, 20 septembre 2023, 1-13. <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2260771>.
- Villalobos, Roberto. 2024. « A New Proposal for the Architectural Stratigraphic Analysis and the Resulting Diagram ». *Acta IMEKO* 13 (2): 2.
<https://doi.org/10.21014/actaimeko.v13i2.1729>.
- Viollet-le-Duc, Eugène. 1854. *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*. Paris: BANCE-MOREL.
- Wazzan), Léon l'Africain (Al-Hasan ibn Muhammad al-. 1896. *Description de l'Afrique : tierce partie du monde*. Édité par Charles Henri Auguste Schefer. Vol. 2. Paris: E. Leroux. <https://archive.org/details/descriptiondelaf02leoa>.

- Winckelmann, Johann Joachim. 1802. *Histoire de l'art chez les Anciens. T. 1.*
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1040211r>.
- Wu, Chao, Yongbo Yuan, Yang Tang, et Boquan Tian. 2022. « Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry ». *Sensors* 22 (1): 265.
<https://doi.org/10.3390/s22010265>.

Liste des annexes

Annexe A : Références à la pluralité constructive et à la diachronie des œuvres du patrimoine bâti dans les chartes de l'ICOMOS

- **Charte de Venise. 1964**

Article 11.

Les apports valables de toutes les époques à l'édification d'un monument doivent être respectés, l'unité de style n'étant pas un but à atteindre au cours d'une restauration. Lorsqu'un édifice comporte plusieurs états superposés, le dégagement d'un état sous-jacent ne se justifie qu'exceptionnellement et à condition que les éléments enlevés ne présentent que peu d'intérêt, que la composition mise au jour constitue un témoignage de haute valeur historique, archéologique ou esthétique, et que son état de conservation soit jugé suffisant. Le jugement sur la valeur des éléments en question et la décision sur les éliminations à opérer ne peuvent dépendre du seul auteur du projet.

- **Le document de NARA sur l'authenticité (1994)**

4. Dans un monde en proie aux forces de globalisation et de banalisation et au sein duquel la revendication de l'identité culturelle s'exprime parfois au travers d'un nationalisme agressif et de l'élimination des cultures minoritaires, la contribution première de la prise en compte de l'authenticité consiste, aussi dans la conservation du patrimoine culturel, à respecter et mettre en lumière toutes les facettes de la mémoire collective de l'humanité.

Diversité culturelle et diversité du patrimoine

5. La diversité des cultures et du patrimoine culturel constitue une richesse intellectuelle et spirituelle irremplaçable pour toute l'humanité. Elle doit être reconnue comme un aspect essentiel de son développement. Non seulement sa protection, mais aussi sa promotion, demeurent des facteurs fondamentaux du développement de l'humanité.

6. Cette diversité s'exprime aussi bien dans une dimension spatiale que temporelle tant pour les cultures que pour les modes de vie qui leur sont liés. Dans le cas où les différences entre cultures seraient à l'origine de situations conflictuelles, le respect de la diversité culturelle requiert la reconnaissance de la légitimité des valeurs spécifiques de toutes les parties en cause.

- **Charte ICOMOS ENAME, 2007**

3.2 Les contributions de toutes les périodes historiques à la signification d'un site seront respectées. Même si des époques ou des thèmes particuliers peuvent être mis en évidence, toutes les périodes de l'histoire du site, ainsi que son insertion et sa signifi-

tion contemporaines, seront prises en considération dans la démarche d'interprétation.

3.3 L'interprétation prendra aussi en considération les contributions culturelles de toutes les communautés associées au site et notamment celles des groupes minoritaires.

- **Principes de la Valette. 2011.**

b Changement et contexte bâti

Au sujet de l'architecture moderne, la Charte de Washington énonçait:

«L'introduction d'éléments contemporains, en harmonie avec leur environnement ne doit pas être découragée, car chaque détail peut contribuer à l'enrichissement de l'ensemble».

L'introduction d'éléments d'architecture contemporaine doit

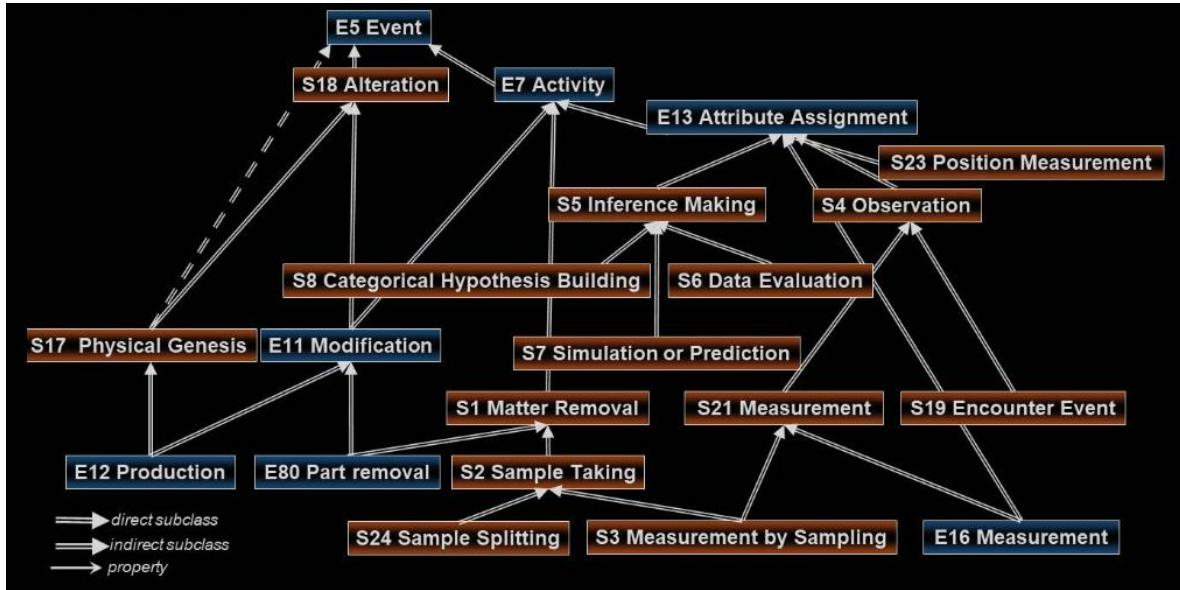
respecter les valeurs du site et de ses abords. Elle contribue à enrichir la ville, en maintenant vivante la continuité de son histoire esthétique.

Le respect des valeurs, modèles et strates historiques doit inspirer des interventions architecturales appropriées à leurs conditions spatiales, visuelles, immatérielles, fonctionnelles.

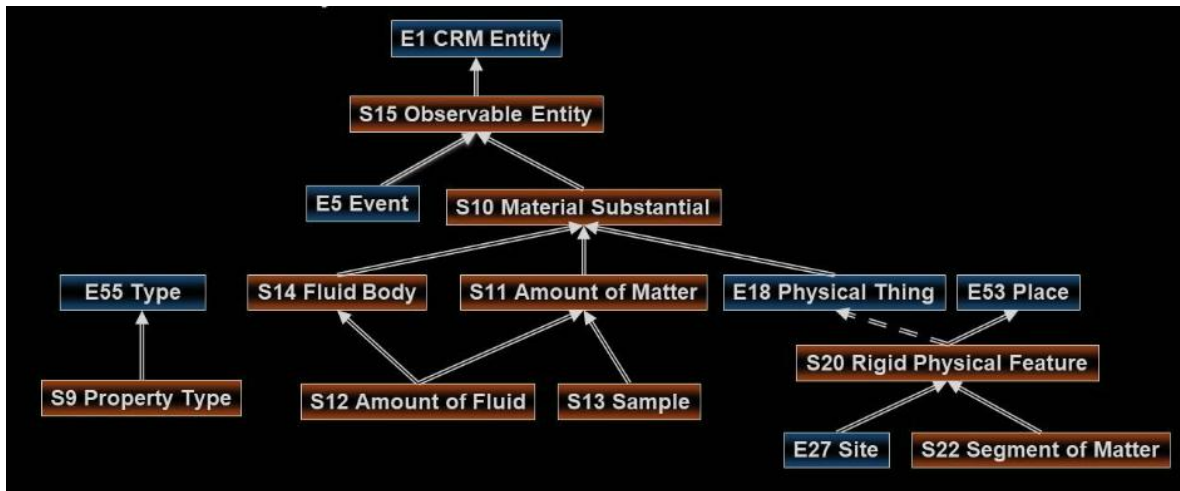
L'architecture nouvelle doit être cohérente avec l'organisation spatiale de l'ensemble historique et respectueuse de sa morphologie traditionnelle, tout en exprimant les modes architecturales de son temps. Indépendamment de ses style et moyens d'expression, toute nouvelle architecture devra éviter les effets négatifs de contrastes drastiques ou excessifs, les fragmentations et interruptions de la continuité du tissu urbain.

Annexe B : Diagrammes représentatifs des modèles conceptuels ontologiques mobilisés pour la définition du modèle stratigraphique

- CRM-sci : les figures ‘a’ et ‘b’ représentent les différentes classes de l’ontologie CRM-sci en rouge, et leur relations avec les classes de l’ontologie mère CIDOC-CRM en bleu

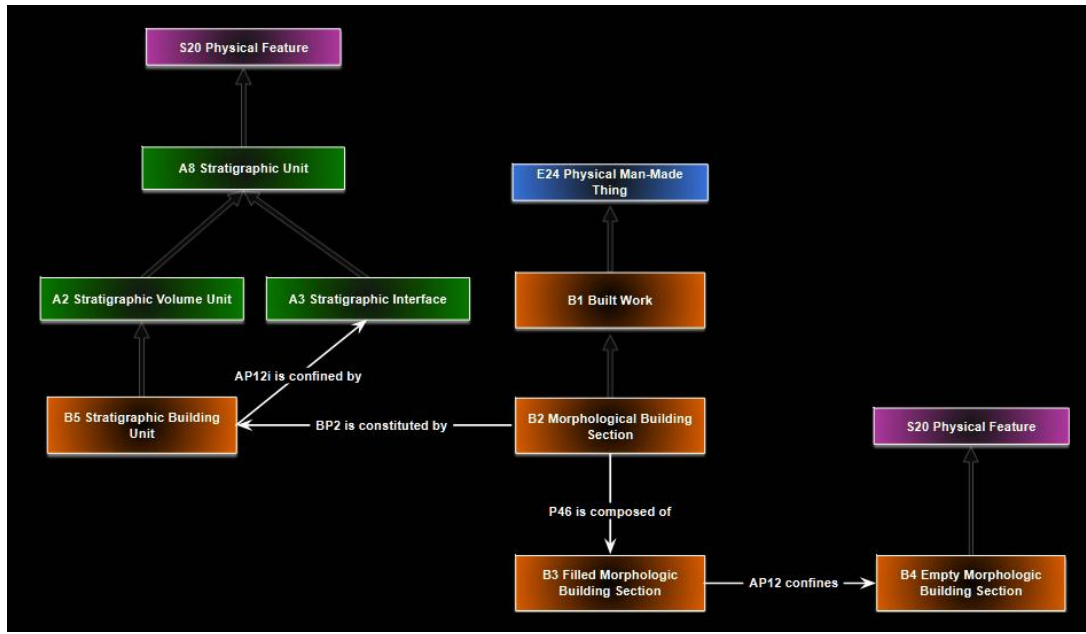


a. Source : Doerr et al, 2023



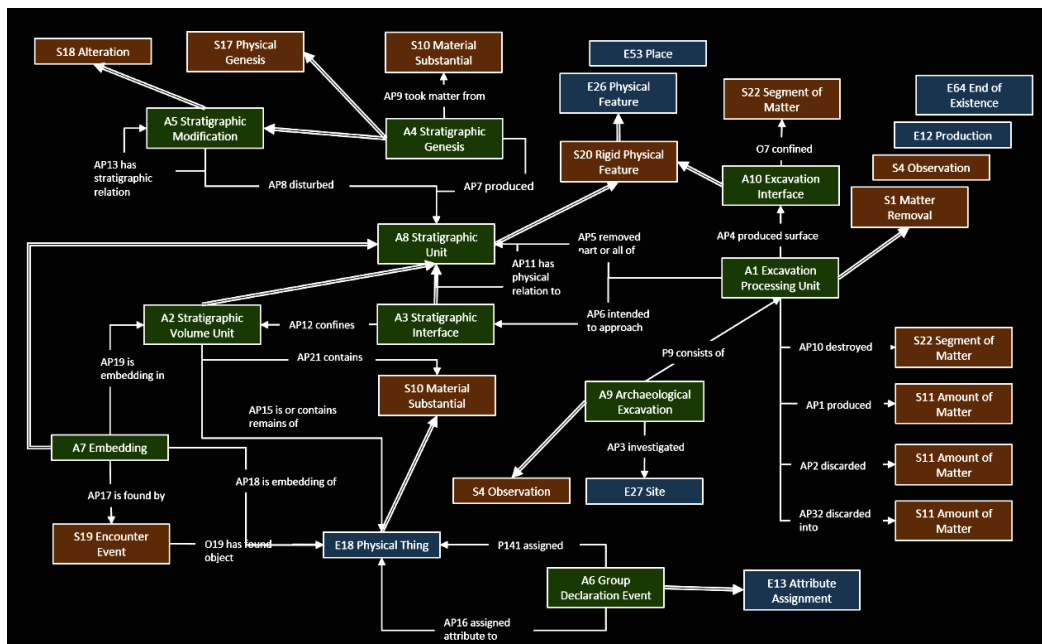
b. Source : Doerr et al, 2023

- CRM-ba : la figure ‘c’ représente les différentes classes de l’ontologie CRM-ba en oranger, et leur relations avec les classes des modèles ontologique CIDOC-CRM en bleu, CRM-sci en mauve, et CRM-archaeo en vert



c. Source : Ronzino et al, 2016.

- *CRM-archaeo* : la figure 'd' représente les différentes classes de l'ontologie CRM-archaeo en vert, et leur relations avec les classes des modèles ontologique CIDOC-CRM en bleu et CRM-sci en marron



d. Christaki et al, 2023

Annexe C : implémentation du logiciel de visualisation stratigraphique multimodale proposé.

Les pages suivantes reproduisent un extrait de l'article publié dans : [*Haouacha, F., Ravaglia, J., & Boufenara, K. (2025).*<https://doi.org/10.1080/15583058.2025.2492239>], reproduit dans le cadre de la thèse de doctorat de l'auteure, conformément aux droits conservés selon le contrat d'édition, avec mention de la publication originale dans la revue.

Le logiciel prototype proposé permet l'affichage, la manipulation et la mise en correspondance des données à la fois sur le nuage de points 3D et sur les graphiques temporels. Il a été développé en C++, un langage de programmation orienté objet largement utilisé pour les applications de bureau, particulièrement adapté au traitement des nuages de points et garantissant de hautes performances.

Grâce à ce choix technologique, le logiciel peut tirer parti de bibliothèques C++ existantes dédiées au traitement des nuages de points, telles que la Point Cloud Library (PCL) (Rusu et Cousins, 2011), afin d'intégrer de nouveaux outils de segmentation.

Les composants graphiques de rendu 3D reposent sur OpenGL, la norme de référence pour le rendu graphique haute performance. Cette base assure la visualisation en temps réel et la synchronisation entre le nuage de points 3D et la frise chronologique. De plus, elle offre la possibilité d'ajouter ultérieurement de nouvelles extensions avec des modifications minimales — par exemple une intégration avec OpenGL ES pour les appareils mobiles ou avec WebGL pour une utilisation sur le web.

Le système de fenêtrage (création, gestion et interaction avec les fenêtres) s'appuie sur la bibliothèque GLFW, légère et performante, tandis que l'interface utilisateur est développée avec Dear ImGui, une bibliothèque C++ rapide et sans dépendances, garantissant ainsi un logiciel autonome et facilement maintenable.

Architecture logicielle :

L'architecture du logiciel repose sur trois classes principales : la classe *Stratified_Building*, la classe *Stratigraphic_Building_Unit* (SBU), et la classe *Chronological_Unit* (ChU) (Figure. 45).

La classe *Stratified_Building* gère les paramètres généraux d'affichage.

La classe *Stratigraphic_Building_Unit* représente les différentes unités stratigraphiques du bâtiment (SBU) identifiées, avec leurs métadonnées associées (par exemple, nom et couleur d'affichage). Elle comprend également un champ indiquant les unités chronologiques auxquelles chaque SBU appartient.

Enfin, la classe *Chronological_Unit* définit les bornes temporelles (début et fin) de chaque période chronologique et

référence la liste complète des SBU qu'elle regroupe.

Interface et fonctionnalités :

L'interface du logiciel se compose de trois parties principales (Figure. 46) :

Un panneau de contenu des données, Un panneau de visualisation temporelle (timeline), Une scène 3D interactif.

1. Panneau de contenu des données

Ce panneau contient les informations générales relatives à l'étude de cas. Il liste toutes les SBU importées à partir du nuage de points 3D et permet de leur associer des métadonnées.

Il comprend également un menu déroulant pour la création et la documentation des unités chronologiques.

2. Panneau temporel (timeline)

Le panneau temporel offre une vue 2D de la structure temporelle des unités sous forme de frise chronologique. Il représente de manière schématique l'organisation et l'évolution des SBU à l'intérieur de leurs unités chronologiques respectives. Chaque ChU apparaît sous la forme d'un cadre couvrant la période correspondante, sur lequel sont superposées les SBU qu'elle contient.

Pour une meilleure lisibilité, chaque unité est colorée selon le code défini par l'utilisateur dans le panneau de données. Deux lignes verticales délimitent la période à visualiser dans la fenêtre 3D.

3. Visualiseur 3D

Le visualiseur 3D permet un rendu interactif du nuage de points, selon différentes options d'affichage : couleurs originales, couleurs des SBU, ou couleurs des ChU.

Il est synchronisé avec la frise chronologique : toute modification de la période affichée dans le graphe timeline met automatiquement à jour la vue 3D pour ne montrer que les unités correspondant à cette période. De même, toute modification apportée dans le panneau de données (par exemple, changement de nom ou de couleur d'une unité) est répercutée automatiquement sur le visualiseur 3D et la timeline.

Ainsi, le logiciel permet d'associer directement les sous-ensembles stratigraphiques identifiés aux données graphiques, offrant une visualisation interactive du modèle 3D à travers le temps — soit selon son organisation stratigraphique, soit selon ses couches chronologiques.

Traduit de l'anglais par l'auteure.

Annexe D : Guide d'utilisation et de fonctionnement du logiciel de visualisation stratigraphique implémenté

Les pages suivantes reproduisent un extrait de l'article publié dans : [*Haouacha, F., Ravaglia, J., & Boufenara, K. (2025). <https://doi.org/10.1080/15583058.2025.2492239>*], reproduit dans le cadre de la thèse de doctorat de l'auteure, conformément aux droits conservés selon le contrat d'édition, avec mention de la publication originale dans la revue.

Traduit par l'auteure.

Le logiciel prend en charge, comme données d'entrée, des nuages de points préalablement segmentés et enregistrés au format ASCII (table. 5), lesquels peuvent être importés à l'aide de la fonction « open site study » disponible dans le menu « fichier ».

Les régions ainsi désignées sont enregistrées sous forme d'attributs comportant des valeurs scalaires uniques. Chacune d'elles est représentée, dans le panneau de contenu, comme une couche spécifique constituant une instance de la classe `Stratigraphic_Building_Unit`, et dans la frise chronologique comme un axe temporel, encore non associé à une période définie, ou à un code couleur. (Voir ci-dessous la figure. e)

La segmentation de ces unités stratigraphiques de bâtiment n'est pas effectuée dans le logiciel lui-même, qui n'intègre aucun outil de segmentation. L'utilisateur choisit donc au préalable la méthode et les outils de segmentation les plus appropriés, selon le cas d'étude, le niveau de granularité souhaité et les objectifs de l'analyse.

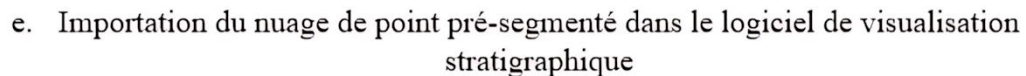
Depuis le panneau de contenu, l'utilisateur peut créer et attribuer une unité chronologique à chaque unité stratigraphique, en renseignant les dates de début et de fin d'existence. Toutes les unités — qu'elles soient stratigraphiques ou chronologiques — peuvent être documentées par l'ajout de métadonnées et se voir attribuer une couleur distinctive.

De plus, une case à cocher « Afficher » est disponible pour chaque entité, permettant de masquer ou d'afficher certaines parties du nuage de points. (Voir ci-dessous la figure. f)

Les frises chronologiques sont générées et organisées en temps réel dans le panneau de visualisation séquentielle, à mesure que les unités stratigraphiques et chronologiques sont renseignées dans le panneau de contenu. Dans ce panneau, l'utilisateur peut zoomer, dézoomer ou déplacer la frise temporelle afin de délimiter et examiner une phase ou une période spécifique d'intérêt.

Dans le visualiseur 3D, chaque instance de SBU est chargée comme un nuage de

stratigraphiques, soit encore avec celles associées aux unités chronologiques. L'utilisateur peut également restreindre la visualisation aux unités correspondant à une période définie dans le panneau temporel, en utilisant les barres de défilement du visualiseur séquentiel.



Stratigraphic unit 14
Stratigraphic unit 15
Stratigraphic unit 16

Stratigraphic unit 16

Name

☒ Show

R:255
G:128
B:204

Pick a color

Default chronologic unit

Chrono unit

Default chronologic unit

Available cl

200.000000

Begin date

2001.000000

End date

Chronologic unit set

Default chronologic unit

Default chronologic unit

Name

☒ Show

0.000000

Begin date

2023.000000

End date

R: 59
G: 48
B: 48
A:255

Select color

Contains:

Stratigraphic unit 1

Stratigraphic unit 4

Stratigraphic unit 2

Stratigraphic unit 8

Stratigraphic unit 6

Menu de saisie des informations des SBUs

Menu de saisie des informations des ChUs

e. Menu d'attribution des métadonnées et des informations

Annexe E : Pipeline de reconstruction du nuage de points dense et du maillage sous Meshroom

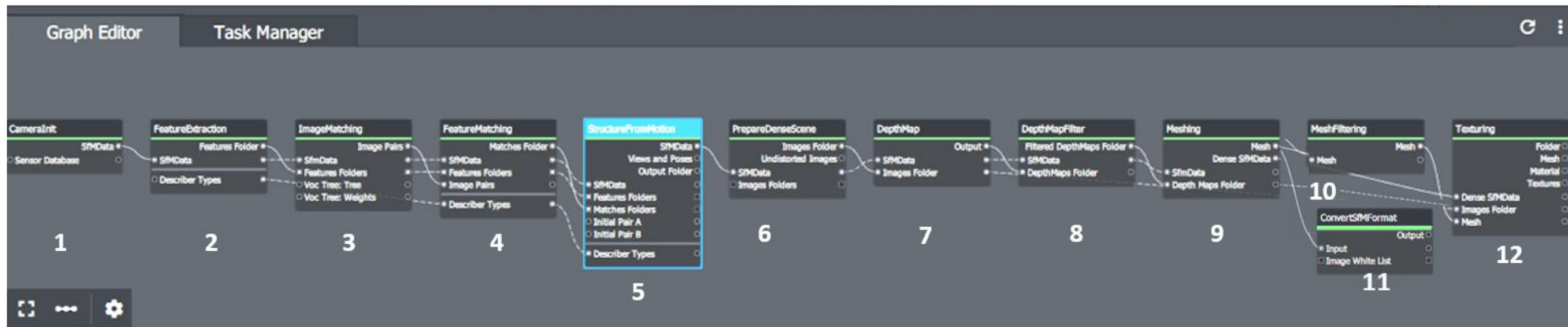
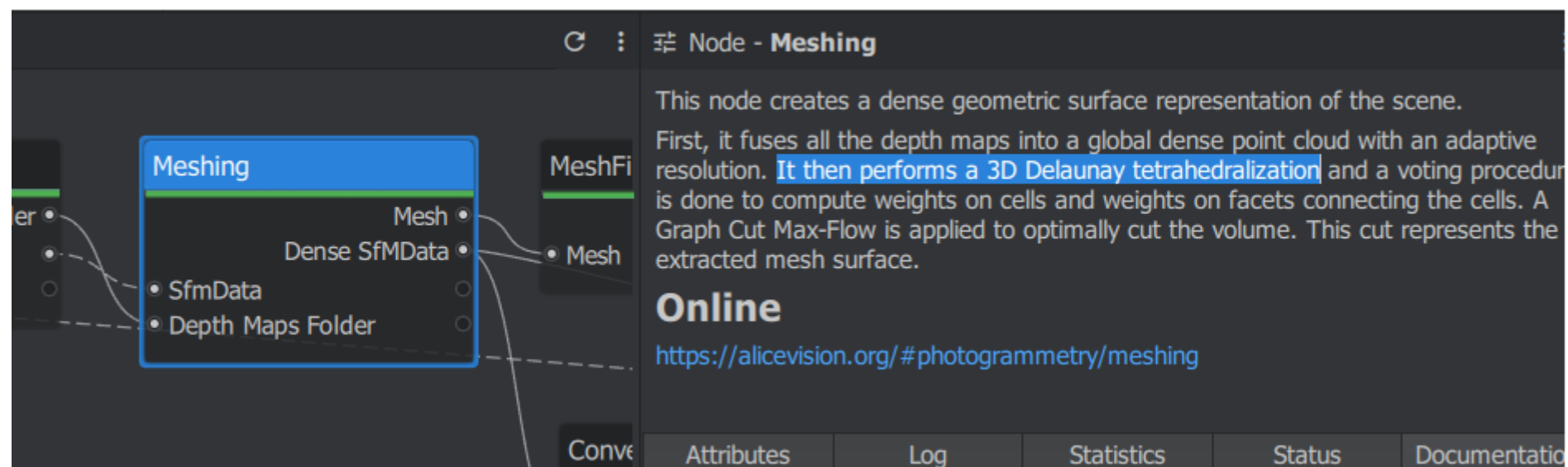


Schéma global du **pipeline de Meshroom**



Description du nœud Meshing et de l'algorithme utilisé par défaut

La photogrammétrie est une technique de modélisation tridimensionnelle fondée sur l'analyse géométrique d'images. Elle constitue, en quelque sorte, le processus inverse de la photographie : à partir de clichés 2D, elle permet de reconstituer automatiquement, avec précision et sans contact, la géométrie 3D d'un objet ou d'une scène.

Cette méthode consiste à extraire des informations métriques (formes, dimensions, positions) et texturales à partir de plusieurs photographies prises sous différents points de vue, en s'appuyant sur le principe de la vision stéréoscopique

La figure ci-dessus illustre les principaux nœuds d'opérations exécutés dans Meshroom pour la génération d'un nuage de points dense, puis d'un maillage 3D à partir d'un ensemble d'images.

Certains nœuds du pipeline sont placés et configurés par défaut ; toutefois, certains éléments — tels que le nœud `convertSMFformat` présenté dans notre pipeline — peuvent être personnalisés afin d'adapter le processus aux besoins spécifiques du projet.

Les fonctions respectives des différents nœuds du pipeline sont décrites dans le tableau ci-dessus

n° du nœud	Nom du nœud	Traitement effectué
1	CameraInit	Ce nœud sert à initialiser les paramètres de la caméra et à organiser le jeu d'images pour le traitement photogrammétrique. Il définit les modèles de caméra, regroupe les images partageant les mêmes propriétés optiques et prépare les informations nécessaires à la calibration.
2	FeatureExtraction	Ce nœud a pour fonction principale d'analyser chaque image du jeu de données pour en extraire des points d'intérêt (ou features) et en calculer des descripteurs. Plusieurs algorithmes peuvent être mobilisés (akaze, Sift)
3	ImageMatching	Ce nœud a pour fonction de déterminer quelles paires d'images du jeu de données ont suffisamment de recouvrement pour être comparées. Il établit une liste de couples d'images potentiellement compatibles pour la suite du traitement.

4	FeatureMatching	Cette étape permet d'établir les correspondances spatiales nécessaires à la calibration et à la reconstruction 3D a pour objectif d'identifier les points communs entre les paires d'images sélectionnées par le nœud ImageMatching, en se basant sur les descripteurs extraits lors de l'étape FeatureExtraction.
5	StructureFromMotion	L'opération StructureFromMotion (SfM) sert à reconstituer la géométrie 3D de la scène par une reconstruction incrémentale des positions et des orientations des différents points partant des paires d'images présélectionnées. Cette procédure permet de calculer à la fois la position et l'orientation de chaque caméra, ainsi que la structure spatiale des points 3D apparaissant dans plusieurs images. A l'issue de cette opération, on obtient un nuage de points épars.
6	PrepareDenseScene	Ce nœud sert à préparer les données du nuage de point epars en vue de la génération du nuage de points dense. Il organise et convertit les informations (caméras, poses, images et structure 3D) dans un format compatible avec les algorithmes de calcul de cartes de profondeur (DepthMap).
7	DepthMap	La procédure DepthMap calcule, pour chaque image, une carte de profondeur qui indique la distance entre la caméra et les surfaces visibles de la scène. Ces cartes sont ensuite fusionnées pour générer un nuage de points dense, beaucoup plus détaillé que celui produit dans la phase SFM.

8	DepthMapFilter	Le nœud DepthMapFilter a pour fonction de fusionner, filtrer et affiner les cartes de profondeur générées pour chaque image. Il combine ces cartes en un nuage de points dense cohérent et dépourvu de bruit, prêt à être transformé en maillage 3D.
9	Meshing	Ce Nœud a pour rôle la création d'une enveloppe extérieure au nuage de point. Il sert à convertir le nuage de points dense en une surface triangulée (mesh). Autrement dit, il crée la géométrie 3D du modèle en reliant les points du nuage par des triangles formant une surface continue. C'est dans ce nœud qu'on a eu recours à l'algorithme de Delaunay
10	MeshFiltering	Le nœud MeshFiltering sert au rééchantillonnage et correction topologique, affiner et optimiser le maillage 3D, afin d'obtenir un modèle plus cohérent, plus léger et prêt pour la texturation. Plusieurs algorithmes peuvent être mobilisés par ce nœud tel que Laplacian, Normal Recomputaion....etc
11	ConvertSfmFormat	Ce nœud n'apparaît pas dans le pipeline par défaut, mais nous l'avons inséré de manière personnalisée. Il sert à convertir et à reformater les données SfM générées par le nœud StructureFromMotion dans un format standard exploitable, garantissant l'interopérabilité du modèle 3D en sortie.
12	Texturing	Le nœud Texturing sert à projeter les couleurs des images d'entrée sur le maillage 3D. Il combine les informations géométriques (position des caméras, maillage) et photométriques (pixels des images) pour générer un modèle 3D photoréaliste.

Annexe F : Étapes de l'identification et de la délimitation des unités stratigraphiques du bâti par segmentation supervisée.

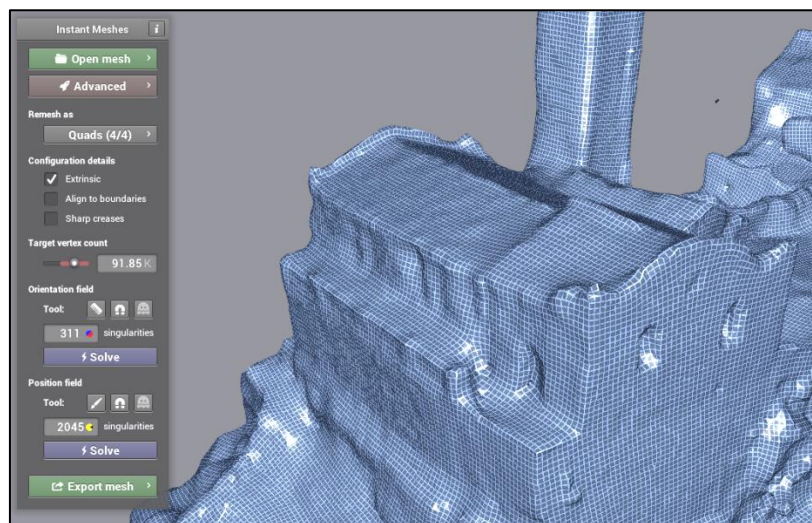
- **Etape préparatoire** : liste des échantillons identifiés et utilisés comme données d'entraînement — Ground-truth — du modèle d'apprentissage

Identification SBU	Description de l'unité	Illustration
Stratigraphic-Building-Unit_001	Mur à revêtement monochrome	
Stratigraphic-Building-Unit_002	éléments à revêtement polychrome	
Stratigraphic-Building-Unit_003	maçonnerie de moellons assisés	
Stratigraphic-Building-Unit_004	maçonnerie de moellons irréguliers	
Stratigraphic-Building-Unit_005	maçonnerie de moellons irréguliers_2	
Stratigraphic-Building-Unit_006	Couverture en tuile	

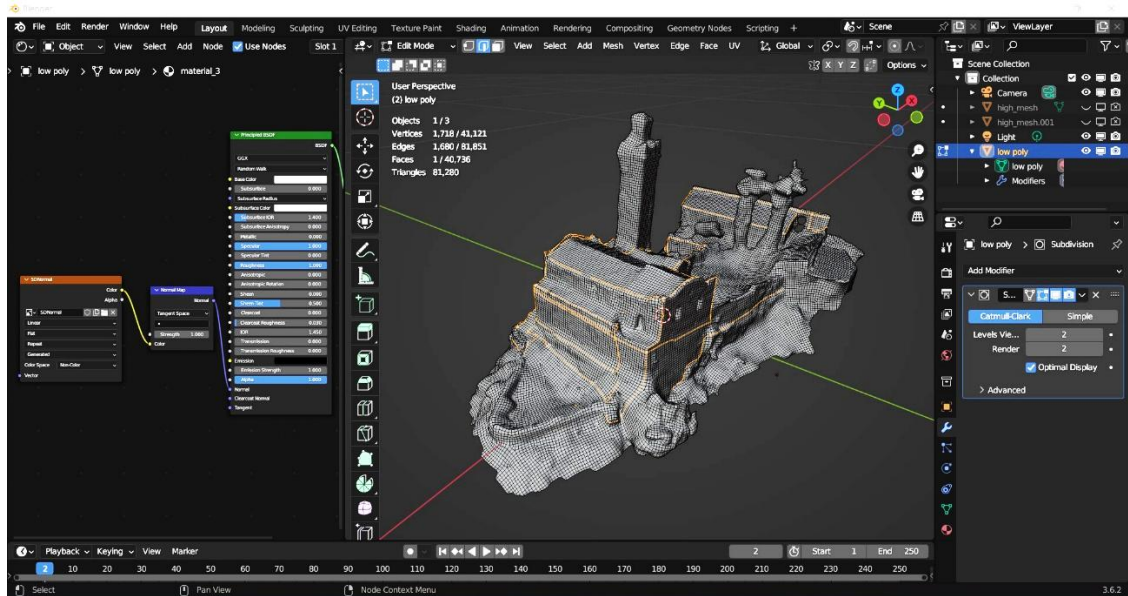
Stratigraphic-Building-Unit_007	maçonnerie en pierre de taille	
Stratigraphic-Building-Unit_008	maçonnerie à bossage	
Stratigraphic-Building-Unit_009	Balustrade moderne	
Stratigraphic-Building-Unit_010	Balcon urbain	
Stratigraphic-Building-Unit_011	Maçonnerie à refends	
Stratigraphic-Building-Unit_012	maçonnerie de moellons assisés_2	
Stratigraphic-Building-Unit_013	maçonnerie de moellons assisés_3	

Stratigraphic-Building-Unit_014	Dallage	
Stratigraphic-Building-Unit_015	Rocher	
Stratigraphic-Building-Unit_016	Unité de dégradation	
Stratigraphic-Building-Unit_017	Unité de dégradation_2	

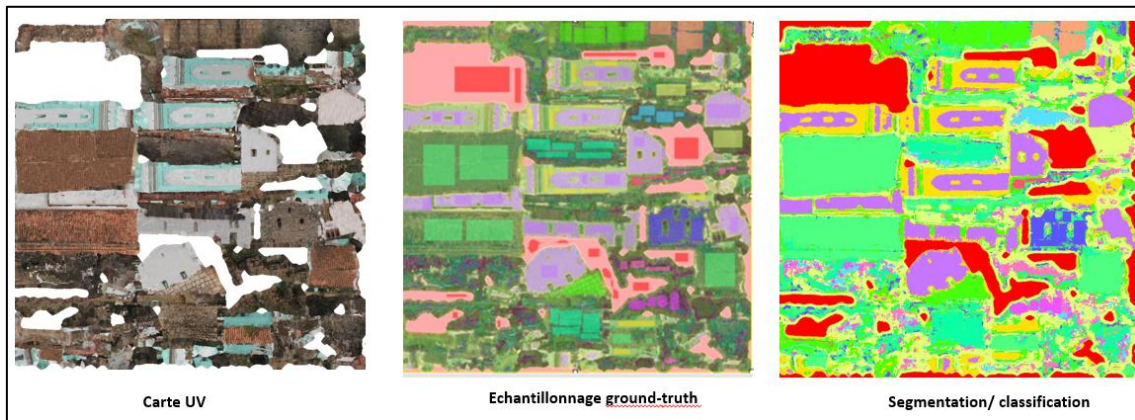
- ***Etape1***: simplification de la géométrie du maillage 3D en modèle quadrangulaire avec l'outil instant-meshes



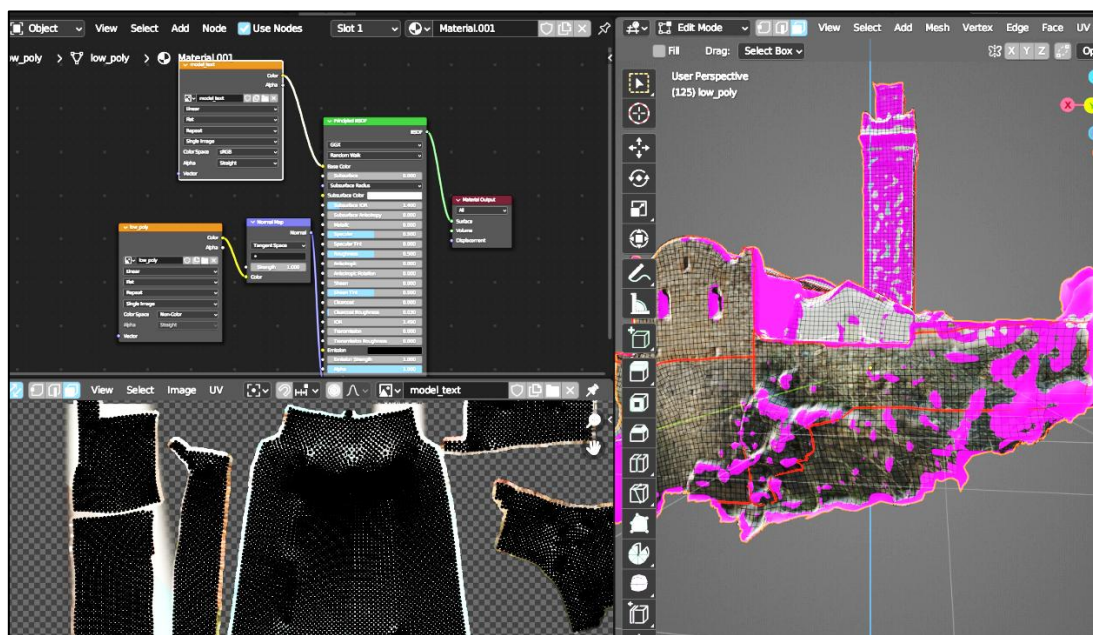
- ***Etape 2*** : définition des arrêtes du maillage 3D et dépliage du modèle 3D en une carte UV bidimensionnelle comprenant les différentes éléments composant la maquette numérique sur le logiciel Blender.

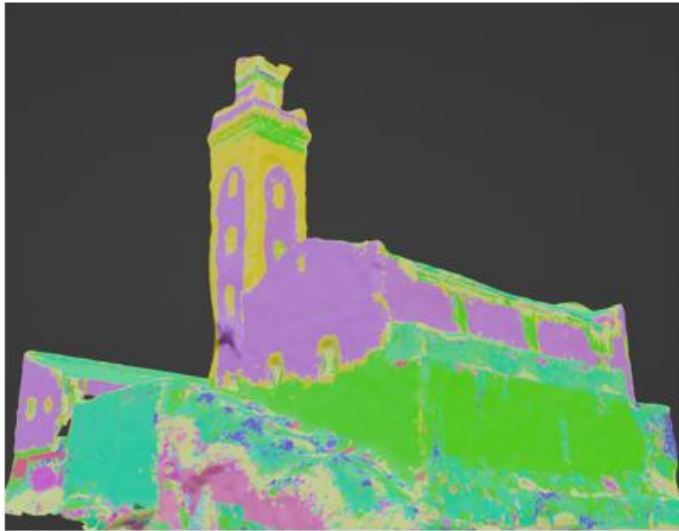


- **Etape 3** : échantillonnage, entraînement du modèle, et segmentation de la carte UVen utilisant le programme Fiji ImageJ avec le plugin Trainable Weka Segmentation

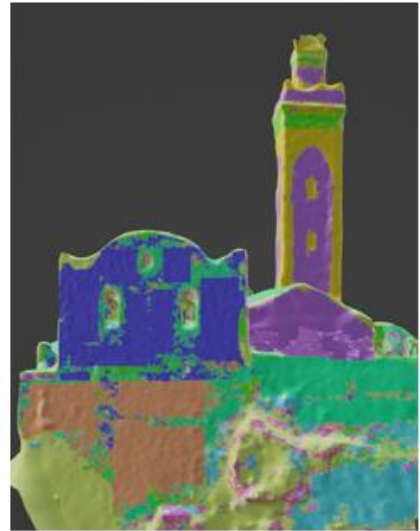


- **Etape 4** : rétroprojection de la carte thématique générée par la segmentation supervisée comme texture du modèle 3D sur Blender





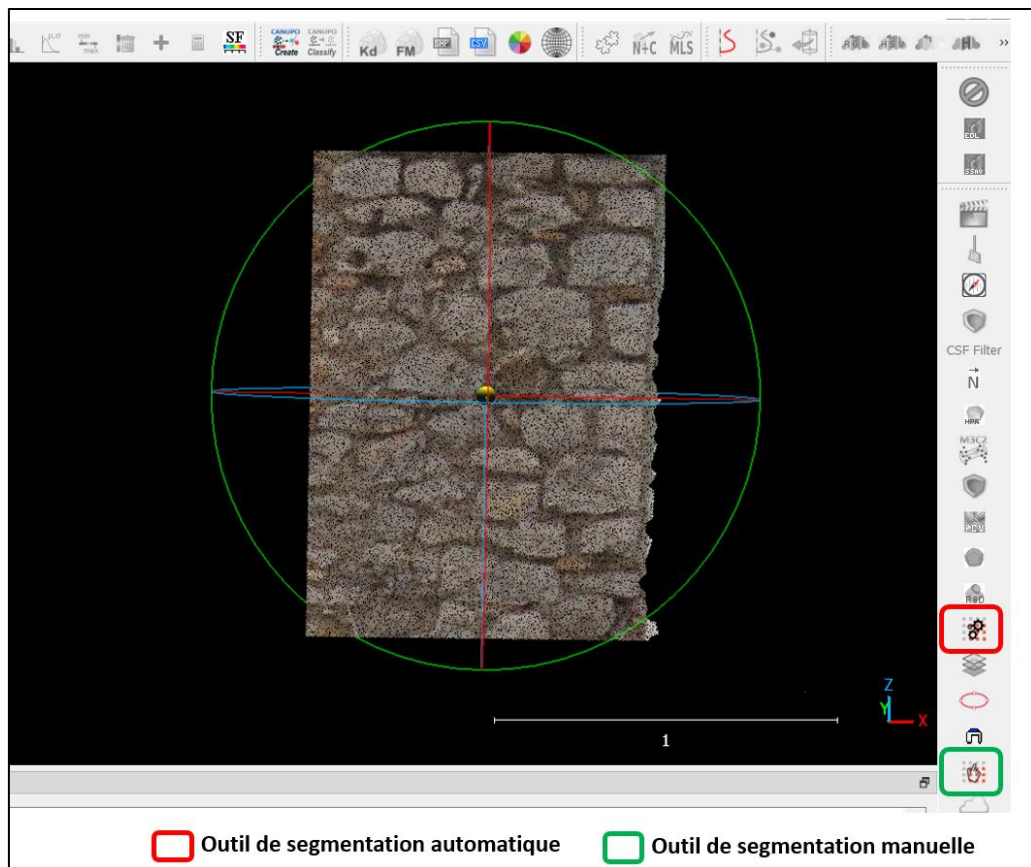
Vue Sud-Est



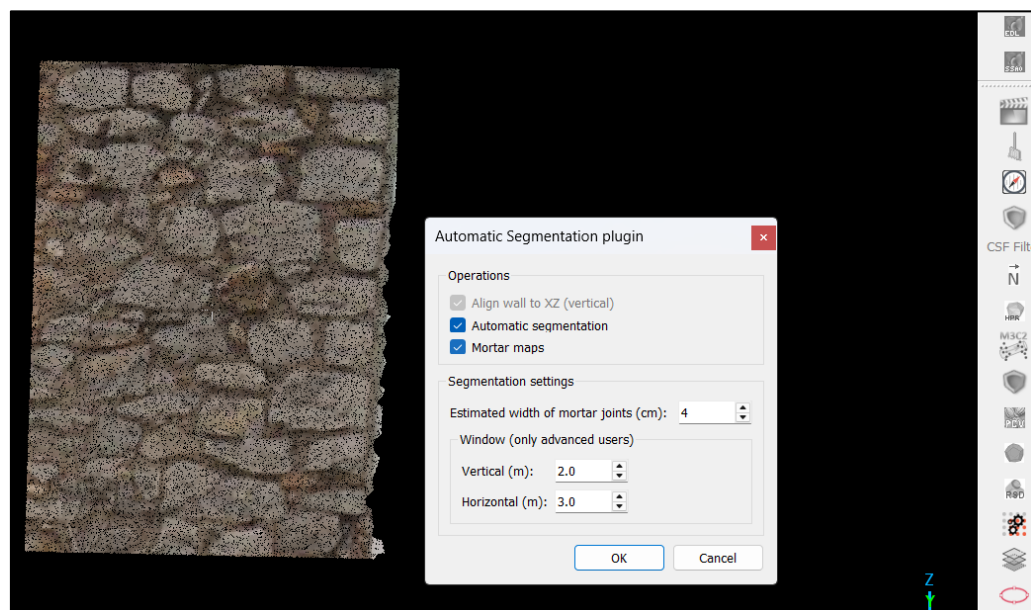
Vue Sud-Ouest

Annexe G : processus de segmentation du nuage de point pierre par pierre

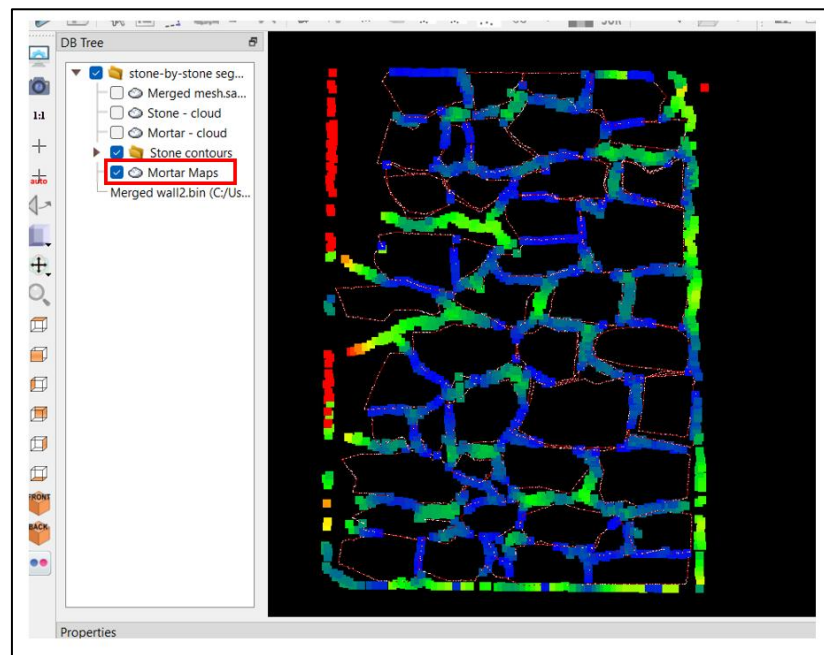
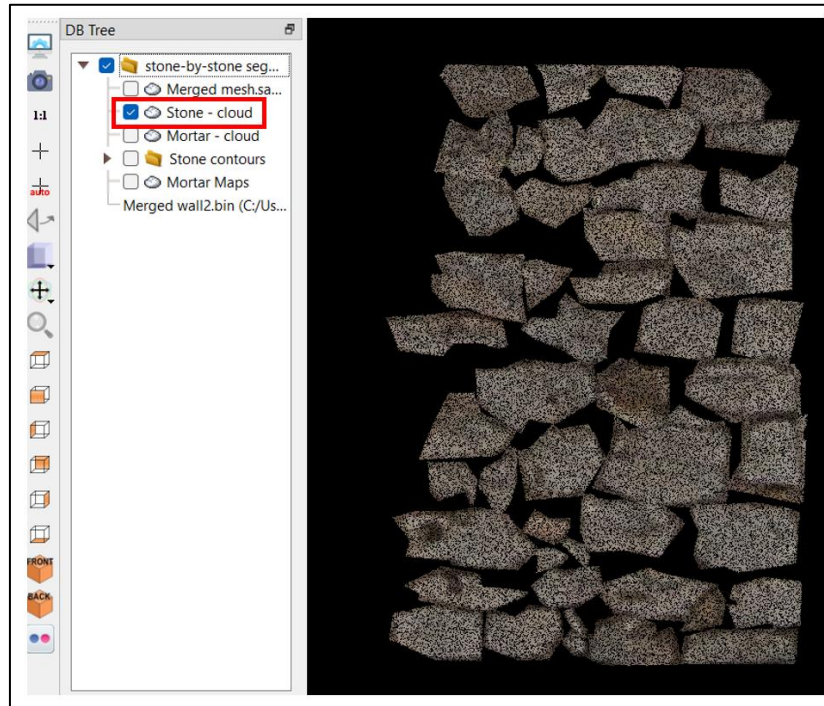
- **Etape 1** : création d'une ortho-photo de la paroi sélectionnée pour segmentation



- **Etape 2** : Introduction de la valeur approximative de l'épaisseur du mortier comme paramètre de référence pour la détection des joints



- **Etape 3** : Deux calques distincts ont été créés : « stone-cloud », rassemblant les blocs de pierre, et « mortar-map », destiné à la cartographie du mortier.



Annexe H : Extraits d'archives relatifs à l'état des lieux du quartier Sidi Rached lors de la construction du pont Sidi Rached

- Extraits d'un article dans le journal la Dépêche de Constantine n°2583 parut le Jeudi 9 Décembre 1915

Conseil Municipal de Constantine

(SUITE)

Lecture est ensuite donnée d'un rapport de la commission des travaux présidée par M. Momy, relatif au chemin des carrières au faubourg Lamy. Ce rapport constate qu'il est absolument impossible de tenir ce chemin en bon état en raison des charrois provoqués par les carrières.

Ce rapport conclut : 1° à ce que les exploitants des carrières devront remettre, tous les ans à la commune, la quantité de caillasse nécessaire pour un parfait entretien de ce chemin ;

2° A ce que, dans le cas contraire, les transports devront être limités par arrêté, à deux colliers.

Cette décision va être immédiatement appliquée.

Communication est également faite d'un rapport de la commission des travaux relatif aux rues du quartier arabe, sous le pont Sidi-Rached.

Etant donné l'importance de ce rapport, nous tenons à le publier. Le voici :

L'an 1915 et le 19 novembre, à 14 heures, la commission des travaux communaux s'est transportée au pont de Sidi-Rached, à l'effet de statuer sur le bien fondé d'une pétition adressée à M. le Maire par MM. les conseillers municipaux indigènes, signalant l'état défectueux des rues du quartier de Sidi-Rached dont les extrémités aboutissent contre ce pont, et tout particulièrement aux abords du dispensaire, et la rue Sidi-Rached conduisant à la mosquée de ce nom. Etaient présents : MM. Momy, adjoint aux travaux, pré-

Après examen des lieux, la commission est unanime à reconnaître l'état déplorable de la rue de la Côte, des extrémités des rues ayant issue sous le pont de Sidi-Rached, des abords du dispensaire et de la rue Sidi-Rached. Elle reconnaît que certains travaux s'imposent d'urgence et prend les décisions ci-après :

1° Prolongement jusqu'au sol du chemin passant sous le pont Sidi-Rached, au moyen de colonnes en fontes appuyées contre des parements, des douelles et des piles, des barbacanes ménagées dans les voûtes du dit pont. Ce travail dépendant directement de la construction du pont, M. Mercadier est consulté à ce sujet et déclare que la dépense d'établissement des dites colonnes pourra être prise en charge par le service des Ponts et Chaussées ;

2° La construction d'un petit mur de retenue des terres contre le talus de la rue Sidi-Rached, en face le bâtiment du dispensaire ;

3° La construction d'autres petits murs qui permettront de redresser le chemin passant entre les piles du pont ;

4° Le rétablissement de plusieurs grilles d'égout pour empêcher les eaux de ruissellement de déferler dans la rue Sidi-Rached et de faire irruption dans la cour de la mosquée de ce nom ;

5° La mise en état de viabilité de la rue de la Côte, entre son origine et la rue Perréaux, au moyen de pas d'âne pavés ;

Le Maire dit que la commission a été présidée par M. Momy. Il tient à la féliciter et à la remercier de son intéressant rapport contenant un ensemble de propositions des plus importantes pour cette partie du quartier indigène. Il remercie également M. Mercadier d'avoir bien voulu assister aux travaux de la Commission et donner son appui à ses diverses propositions. L'idée d'un escalier et d'un ascenseur permettant de monter du village arabe sur le pont est absolument excellente. Il faudra la réaliser. L'ascenseur sera une bonne affaire pour la société électrique qui voudra certainement l'établir.

M. Boucherit demande que les mesures nécessaires soient immédiatement prises pour empêcher les eaux de couler dans la mosquée de Sidi-Rached. Ce sera fait sans délai, dit le Maire.

A propos de la mosquée, le Maire dit qu'un petit projet est, en ce moment, établi par M. Bonnell, comportant l'allocation de quelques crédits par le Gouvernement général, pour l'améliorer, l'embellir et la doter d'un minaret, ce qui sera d'un très bel effet esthétique pour Constantine, à la pointe du Rocher.

Après diverses observations présentées par MM. Réjou, Pastor, Christoffe, Gabens, les conclusions du rapport sont mises aux voix et adoptées.

A propos des écoles primaires supérieures et du taux de la pension devenu insuffisant par suite de la cherté de la vie, le Maire dit que cette question ne peut pas être présentée en ce moment au Conseil. M. l'Inspecteur d'Académie ayant fait observer qu'il doit donner son avis et que l'affaire sera soumise au Conseil à sa prochaine séance.

(à suivre.)

- Extrait des publications de la Société archéologique de Constantine P. 263.

AVILIA LF
MVSF BIA
VIX A XIII
H E S
O T B Q

Enfin, notre distingué confrère, M. le docteur Leroy, a trouvé dans les démolitions du quartier Sidi-Rached, où l'on va construire le futur pont, un petit autel, haut de 0^m33, qu'il a fait apporter au Musée et sur lequel est gravée l'inscription ci-après. C'est une dédicace faite à une ou plusieurs divinités, par un tabernarius (restaurateur, marchand de vin ou boutiquier), qui s'appelait Tu(*lius*) SEX(*tus*) ASICIUS.

V . I . F . V .
O . TV . SEX .
A . SI . CI . VS

TEXTE.

الحمد لله ولما وقع التفصير من وكلاء مساجد فسنطينة ولم يكن
لهم اعتناء بشأن الاوقاف وجرطوا في ذلك غاية التفريط وصاع
الكثير منها بقبولتهم عنها وعدم اعتناء بهم بشأنها ولم يبحثوا
على ذلك وتعطل البعض من المساجد بضياء اوقافها التي مبنى
عمارة الوقف عليها وصار البعض منها بسبب ذلك مربطاً
للدواب والبعض عُلقت عليه الابواب وال امره الى الخراب وبلغ
امر ذلك لحضرة المعظم الاسعد المنصور المويرذي الراء السديد
وحسن الراي سيدنا صالح باي ايده الله تعالى وابقى وجوده
وادام خيراته وجوده فاهمه الله الى احياء ما اندرس من المساجد
والاوقاف وترجمه بكتيبه اعزه الله تعالى الى الكشف عن ذلك
(1) بل يارب ٢ واراد ان يثبت ذلك بثلاث ٣ سجلات متماثلية تحفظها
ويومن بذلك من التبديل والتغيير عليها امر حنيند فضائه
والمقيمين ان يبحثوا على اوقاف المساجد وعلى المساجد التي

(1) Rectification en marge, quatre au lieu de trois.

دثرت ويشبثوا ذلك بثلاث سجلات ٢ متباعدة جامتثلوا ٢ بل باربع سجلات
 امره وبلغوا جهدهم في البحث عن اوقاف المساجد وعن المساجد
 التي دثرت واطلعوا على سجلات المساجد واثبتوا بعد الكشف
 عن ذلك اوقاف مساجد بلد فلسطين بهذا السجل وبسجلين ٢ ٢ بل ثلاثة
 اخرين مهائلين له لفظا ومعني احد السجلات عند صاحب
 بيت المال والثاني عند شيخ البلد والثالث عند فاضي الحنفية
 والرابع عند فاضي المالكية فمن علم ذلك وتحققه وعلم ان
 الطابع المرتسم بطورته اعلاه هو طابع المعظم الاربع سيدنا صالح
 باي ادام الله اوقاته وبارك فيه فيربه وبصمته شهادته هنا
 وذلك اوسط شهر ربيع الاول المنور بمولده صلى الله عليه
 وسلم عام تسعين ومائة والـ

ومن تمامه ان سيدنا صالح باي ايده الله على ان المعاوضة
 لا تقع في اوقاف المساجد اصلا لا بالقليل ولا بالكثير وان وكلاء
 المساجد يحاسبون على اوقاف المساجد من الستة اشهر الى
 الستة اشهر وان الباضل من اوقاف المساجد اي من غلتها
 يتجفده العلماء المنعقد بهم المجلس العلي وصاحب بيت
 المال في كل سنة ومن كثرت غلة اوقافه من المساجد يشتروله
 بما فضل عن حاجة الاوقاف عفارا يصير من جهلة الاوقاف
 صح ذلك

Paraphes et signatures :

محمد بن الموهوب

احمد بن جلول

En tête à gauche, sur le
cachet du bey, est écrit : **عبدہ صالح باي بن مصطفى ١١٨٥**

Autre cachet : **الواثق برب الناس عبدہ بالعباس ١١٨٨**

Autre : **سى شعبان ١١٧٩
بن جلول**

LISTE DES ÉTABLISSEMENTS RELIGIEUX.

- 1 Grande mosquée de la Kasba. — Ruinée.
- 2 Grande mosquée de Betha. — Affectée au culte musulman.
- 3 Mosquée de Souk er R'ezel. — Eglise actuelle.
- 4 — de Sidi Kettani. — Culte musulman, Medersa.
- 5 Grande mosquée de Rahbet es-Souf. — Hôpital civil.
- 6 Mosquée Sidi Mefredj. — Ruinée.
- 7 — Sidi Ali Makhelouf. — Ruinée.
- 8 — Sidi Abd el Kader, à la Kasba. — Ruinée.
- 9 — Sidi Ahmed ben Alennas. — Ruinée.
- 10 — Sidi el Ouared. — Ruinée.
- 11 — Sidi Rbi. — Ruinée.
- 12 — Sidi Rached.
- 13 — Sidi Brahim Rachidi.
- 14 — Arbaïn Cherif.
- 15 — Sidi Sefar.
- 16 — Sidi Youmen.
- 17 — Sidi Fliou el Serir.
- 18 — Sidi Labiod.
- 19 — Sidi Ferr'an.
- 20 — Sidi Mendil.

