

epau

ECOLE POLYTECHNIQUE
D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME

Ecole Polytechnique d'Architecture Et
d'Urbanisme, le Moudjahid Hocine Ait
Ahmed, **EPAU**

Laboratoire : ville, architecture et
patrimoine, **LVAP**



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Università Degli Studi Di Firenze, **Unifi**

Dipartimento di architettura, **DiDA**

Essai d'élaboration d'une démarche méthodologique de diagnostic sur les coupoles du *Souf* en Algérie

Thèse du doctorat en Architecture de

Cheima Azil

Doctorat de recherche en cotutelle :

Formation doctorale :

Patrimoines et cadre bâti ancien

Directeur de thèse

Pr. Boualem Djebri

Curriculum:

*Strutture e Restauro dell'Architettura e del
Patrimonio Culturale Ciclo XXXIII*

Directrice de thèse

Pr. Luisa Rovero

Devant le jury composé de :

Pr. Driss Rahal	Université d'Oran	Président
Dr. Sabrina Kacher	EPAU, Alger	Examinatrice
Pr. Michele Coppola	UNIFI, Florence	Examineur
Pr. Stefano Galassi	UNIFI, Florence	Examineur

2021

Essai d'élaboration d'une démarche méthodologique de diagnostic sur les coupoles du *Souf* en Algérie

Par *Cheima Azil*

Directeur de recherche : *Pr. Boualem Djebri* & Directrice de recherche : *Pr. Luisa*

Rovero

Résumé

Dans les oasis du *Souf* en Algérie, une technique de construction rare et particulière s'est développée au cours des siècles, a permis l'épanouissement d'une architecture vernaculaire unique, qui constitue aujourd'hui un patrimoine précieux inscrit sur la « Liste indicative de l'*UNESCO* ». L'architecture de cette zone désertique repose sur l'utilisation d'un matériau de construction particulier par sa formation et composition : « la pierre de la *Rose des Sables* ». Toutes les constructions historiques ont opté comme mode de franchissement et de couverture : des coupoles, qui décrivent un paysage urbain unique, qui mérite une protection et une mise en valeur. Actuellement, ces centres urbains sont considérablement dégradés et de nombreuses constructions sont endommagées. Outre les nombreux travaux de restauration incohérents, accompagnée d'une perte d'un savoir-faire, se retrouve dans un processus continu d'effondrement qui menace fortement ce patrimoine culturel.

La présente recherche vise à développer un processus de diagnostic méthodologique pour l'architecture vernaculaire en *Rose des Sables*, afin de poursuivre des politiques de sauvegarde cohérentes. En particulier, le centre historique de *Guemar (Souf)* a été choisi comme aire d'étude car il a subi peu de modifications, en conservant son caractère d'origine. Plusieurs activités sur place ont été menées pour replacer le processus de construction de cette culture constructive et la préparation des matériaux de construction qui s'y rapporte. En particulier, l'étude historique, urbaine et architecturale de *Guemar*, s'est accompagnée d'enquêtes géométriques et matérielles, et des entretiens avec des anciens constructeurs locaux.

Les investigations *in situ* ont permis de réaliser un diagnostic préalable qui se résume à recenser, classer les pathologies observées, et enfin à proposer les origines de ces dégradations. Pour vérifier la validité de cette proposition, une évaluation de la

vulnérabilité de la construction a été réalisée. On a procédé sur des échantillons de matériaux collectées des essais successifs : physiques, minéralogiques, pétrographiques et mécaniques afin de déterminer et connaître la composition chimique et le comportement mécanique de la maçonnerie en pierre de *Rose des Sables* dans son ensemble et de ses constituants, à savoir la pierre de *Rose des Sables* et le mortier. De plus, différentes stratégies ont été utilisées pour évaluer le comportement structurel de coupole autonome et de l'ensemble d'une construction en coupoles. En effet, la coupole constitue l'élément le plus vulnérable du système structurel. Tout d'abord, une analyse limite a été utilisée et une interprétation des modèles de fissures typiques ainsi observés.

De plus, les résultats des tests ont été exploités pour construire des modèles des éléments finis (*FEM*), basés sur le levé du Scanner laser 3D (modèle 3D *HBIM*). Des analyses statiques linéaires et non linéaires ont été effectuées à l'aide d'un logiciel commercial. L'étude multidisciplinaire du site au laboratoire, a fourni, d'une part, une interprétation solide des dommages observés et une base sur laquelle pivote des stratégies de conservation spécifiques et, d'autre part, constitue une feuille de route précieuse pour des enquêtes similaires dans le futur.

Mots clés. Architecture vernaculaire ; Coupole ; Pierre de *Rose des Sables* ; Diagnostic ; Caractérisation physique, minéralogique, pétrographique et mécanique (*XRD*; Porosité ouverte, essai de compression, essai de flexion trois points, essai de traction indirecte); Modèle *HBIM* 3D; *FEM* linéaire et non linéaire; Analyse limite.

Metodologia di diagnosi per le cupole di *Souf* in Algeria

Cheima Azil

Tutors: *Pr. Boualem Djebri & Prof.ssa Luisa Rovero*

Abstract (it)

Nelle oasi della regione di *Souf* in Algeria si è sviluppata nel corso dei secoli una tecnica costruttiva molto particolare e quasi sconosciuta, che ha consentito la crescita di architetture vernacolari uniche poste nella "Lista tentativi dell'UNESCO", come patrimonio diffuso prezioso. L'architettura di questa zona desertica si basa sull'uso di un materiale da costruzione insolito, la pietra *Rosa del deserto*, ed è caratterizzato da coperture a cupola, che descrivono un paesaggio urbano unico e sorprendente che merita protezione e valorizzazione. Attualmente, i centri urbani di questa zona sono notevolmente degradati essendoci molti edifici interessati da danni di gravità variabile, dallo stato di rudere all'erosione superficiale dell'intonaco. Oltre ai tanti lavori di restauro incoerenti e alla perdita di conoscenze tradizionali, c'è un continuo processo di demolizione e abbandono di edifici che minaccia fortemente questo patrimonio culturale.

La ricerca mira a sviluppare un processo diagnostico metodologico per architetture vernacolari realizzate in pietra *Rosa del deserto* e per perseguire strategie di salvaguardia coerenti. In particolare, il centro storico di *Guemar* è stato scelto come area di studio perché ha subito poche modifiche, conservando il suo carattere originario.

Un approccio interdisciplinare a più scale di indagine è stato svolto con l'obiettivo primario di conoscere la tecnica costruttiva impiegata nella realizzazione delle architetture vernacolari di *Guemar*. In particolare, lo studio storico, urbano e architettonico di *Guemar* è stato accoppiato a rilievi geometrici e materici, compiendo anche interviste a costruttori locali. Le indagini in situ hanno consentito di effettuare una diagnosi preliminare dei danni ricorrenti, di classificando le patologie osservate e proponendo una interpretazione delle cause. In particolare, è stata effettuata una valutazione di vulnerabilità delle costruzioni e sono stati effettuati campionamenti dei materiali per effettuare test fisici, mineralogici, petrografici e meccanici in laboratorio. Indagini meccaniche indirette sono state svolte anche in situ tramite penetrometro e

sclerometro, oltre ad a investigazioni con la termocamera per indagare sia la tessitura muraria nascosta dietro l'intonaco che la risalita di umidità. Nel complesso sono state determinate sia le caratteristiche tecnologiche della tessitura muratoria e dei particolari costruttivi che la composizione chimica e il comportamento meccanico dei costituenti la muratura, blocchi in pietra *Rosa del Deserto* e malta, e della muratura nel suo complesso. Inoltre, sono state impiegate diverse strategie per valutare il comportamento strutturale della cupola, considerata sia indipendente dalle murature sottostanti che insieme all'intero edificio. La cupola, infatti, costituisce l'elemento più vulnerabile del sistema strutturale. Innanzitutto, è stata applicata l'analisi limite in appoggio statico, tramite l'utilizzazione dei poligoni funicolari, che ha fornito un'interpretazione dei tipici schemi di fessurazione osservati. Inoltre, i risultati dei test meccanici sono stati sfruttati per costruire modelli agli elementi finiti, basati sul rilievo 3D (modello HBIM). Analisi statiche sia lineari che non lineari sono state eseguite tramite un software commerciale, che ha permesso una buona simulazione del comportamento altamente non lineare delle costruzioni osservate.

Lo studio multidisciplinare, dal territorio al laboratorio, ha fornito, da un lato, una solida interpretazione dei danni osservati e una base fondamentale su cui impennare specifiche strategie di conservazione, oltre a costituire una preziosa *road map* per indagini simili in futuro.

Parole chiave. Architettura vernacolare; cupola; Pietra *Rosa del Deserto*; Diagnosi; Caratterizzazione fisica, mineralogica, petrografica e meccanica (XRD; porosità, prova di compressione, prova di flessione su tre punti, prova di trazione indiretta); Modello HBIM 3D; FEM non lineare; Analisi limiti.

Diagnosis methodology for *Souf* domes in Algeria

By *Cheima Azil*

Tutors: *Pr. Boualem Djebri & Pr. Luisa Rovero*

Abstract

In the oases of *Souf* in Algeria, an unknown, particular construction technique has developed during centuries, enabled the flourishing of unique vernacular architecture and constitutes today a widespread and precious heritage included in the "UNESCO Tentative List". The architecture of this desert area is grounded on the use of unusual building material, the *Desert Rose* stone, and shows a distinctive feature. All the historical constructions are covered with domes, which describe a unique and astonishing urban landscape that deserves protection and enhancement. Currently, these urban centres are significantly degraded, and many buildings are damaged. In addition to the many incoherent restoration works and the loss of know-how, there is a continuous process of demolition and abandonment of buildings that strongly threatens this cultural heritage.

The research develops, on a multi-disciplinary base, an architectural knowledge process aimed at pursuing coherent safeguard policies and delivering a methodological framework. To understand implicit rules and founding principles of this culture, several on-site activities have been carried out investigating the building systems, the building techniques and the materials and processes adopted. In particular, the historical centre of *Guemar* was chosen as a case study because it has undergone few modifications and retained its original character. The historical, urban, and architectural study of the city was coupled with geometrical and material surveys; interviews with former local builders have been drawn up as well.

The *in-situ* investigations made it possible to carry out a preliminary diagnosis and to inventory and classify the pathologies observed, and finally to propose the origins of these degradations. To verify the validity of this proposition, a construction vulnerability assessment was carried out. Sampling of materials and successive physical, mineralogical, petrographic and mechanical testing were carried out to define chemical composition and mechanical behaviour of the *Desert Rose* stone masonry as

a whole and of its constituents, i.e. blocks and mortar. Moreover, different strategies were employed in order to assess the structural behaviour of the standalone dome, and of the whole domed building. Indeed, the dome constitutes the most vulnerable element of the structural system. First, limit analysis was used, and an interpretation of the typical crack patterns observed is provided. Furthermore, test results were exploited to build Finite Elements models (FEM), based on the 3D survey (*HBIM* model). Both linear and non-linear static analyses were carried out through a commercial software. The multi-disciplinary study, from site to laboratory, provides, on one hand, a sound interpretation of the observed damages and a robust basis on which pivoting specific conservations strategies and, on the other, constitutes a valuable roadmap for similar investigations in the future.

Keywords. Vernacular architecture; dome; *Desert Rose* stone; Diagnosis; Physical, mineralogical, petrographic and mechanical characterization (XRD; open porosity, compression test, three-point bending test, indirect tension test); 3D *HBIM* model; linear and non-linear *FEM*; Limit analysis.

Table des matières

RESUME.....	I
ABSTRACT (IT)	III
ABSTRACT.....	V
ملخص.....	VII
TABLE DES MATIERES	VIII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XXIII
INTRODUCTION.....	1
1. PREAMBULE.....	1
2. CONSTAT.....	2
3. PROBLEMATIQUE.....	3
4. OBJECTIFS.....	5
5. METHODOLOGIE ET POSITIONNEMENT EPISTEMOLOGIQUE.....	5
a) <i>Dispositif méthodologique</i>	5
1. L'étude historique	6
2. L'étude architecturale et constructive et investigations in situ	6
3. L'étude structurelle et diagnostic	7
b) <i>Positionnement épistémologique</i>	13
6. INTERET, IMPACT, ORIGINALITE ET LIMITES DE LA RECHERCHE	14
a) <i>Impact</i>	15
b) <i>Limite et contrainte</i>	15
7. STRUCTURATION DE LA THESE	17
8. REVUE DE LA LITTERATURE	19
a) <i>Connaissance et étude cognitive</i>	21
1. L'art de bâtir du Souf	21
2. Système de couverture « les coupoles du Souf ».....	22
3. Les matériaux de construction de la coupole du Souf	24
b) <i>Méthodologie et aspects techniques</i>	26

PARTIE I : CONNAISSANCE ET RECONNAISSANCE DE LA RÉGION DU SOUF ET SON PATRIMOINE CULTUREL

CHAPITRE 1 : CONTEXTE HISTORIQUE, URBANISTIQUE ET PATRIMONIAL DU SOUF 31

1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DE LA REGION DU SOUF	31
2. REGION DU SOUF, UN PATRIMOINE INSCRIT DANS LA LISTE INDICATIVE DE L'UNESCO 2002	32
3. CONTEXTE HISTORIQUE DE LA REGION ET LE CHOIX DE L' AIRE D' ETUDE.....	36
4. STRATIFICATION HISTORIQUE ET ANALYSE URBAINE DE GUEMAR	41
5. ANALYSE MORPHOLOGIQUE URBAINE ET ARCHITECTURALE	47
a) <i>Structure morphologique urbaine du centre historique de Guemar</i>	48
b) <i>Morphologie architecturale des maisons</i>	53
6. CONCLUSION	58

CHAPITRE 2 : CULTURE ARCHITECTURALE ET CONSTRUCTIVE DE LA REGION DU SOUF 59

1. RICHESSE GEOLOGIQUE ET MATERIAUX DE CONSTRUCTION	60
2. ELEMENTS ARCHITECTURAUX, TECHNIQUES ET PROCESSUS DE CONSTRUCTION.....	66
a) <i>Fondations</i>	73
b) <i>Eléments verticaux : mur d' élévation et Contrefort</i>	76
c) <i>Ouvertures et arcs</i>	82
d) <i>Systèmes de couverture</i>	86
1. <i>Coupoles et leurs typologies</i>	89
2. <i>Les voûtes</i>	97
3. <i>Système de couverture rare dans la région</i>	98
3. CONCLUSION	99

PARTIE II : PROCESSUS METHODOLOGIQUE DE DIAGNOSTIC

CHAPITRE 3 : INVESTIGATION IN SITU ET DIAGNOSTIC 102

1. ÉTAT DE CONSERVATION ET MENACES.....	102
2. INVENTAIRE DES PHENOMENES DE DEGRADATION AU CENTRE HISTORIQUE GUEMAR ..	105
a) <i>Lésions de la maçonnerie (fracture et fissure)</i>	105
b) <i>Effondrements</i>	111
c) <i>Déformation de la maçonnerie</i>	117
d) <i>Effritements du plâtre et du mortier de jointoiment</i>	118
e) <i>Gonflement, détachement et érosion du plâtre</i>	120
f) <i>Moisissures et efflorescences</i>	120

3.	CLASSIFICATION DES PHENOMENES DE DEGRADATIONS ET LEURS ORIGINES	121
a(<i>Dégradations dues à des facteurs internes</i>	122
b)	<i>Dégradations dues aux facteurs externes</i>	124
4.	CONCLUSION : DEFINITION ET CHOIX DES CAS D'ETUDE.....	128
CHAPITRE 4 : APPROCHE SUR L'ÉVALUATION DE LA VULNERABILITE		
STRUCTURELLE DES CONSTRUCTIONS A COUPOLES EN ROSE DES SABLES 131		
1.	CARACTERISATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION ET INVESTIGATIONS	
EXPERIMENTALES		131
a)	<i>Méthodologies d'échantillonnage et d'analyse</i>	132
b)	<i>Caractérisation physique et chimique (minéralogique et pétrographique) des</i> <i>matériaux</i>	134
1.	Caractérisation physique.....	134
2.	Caractérisation chimique.....	136
c)	<i>Analyse mécanique des matériaux</i>	142
1.	Les composants de la maçonnerie.....	142
2.	La maçonnerie.....	152
2.	ANALYSE DU COMPORTEMENT STRUCTUREL	167
a)	<i>Évaluation du comportement structurel des coupoles</i>	167
b)	<i>Évaluation du comportement structurel des cellules à coupoles</i>	173
1.	Processus de réalisation du modèle 3D	173
2.	Analyses statiques élastiques linéaires et non linéaires	177
3.	CONCLUSION	193
CONCLUSION : SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS 196		
1.	SYNTHESE DES RESULTATS ET DES TRAVAUX REALISES	196
2.	PERSPECTIVES DE LA RECHERCHE.....	203
BIBLIOGRAPHIES* I		
ANNEXES XVI		
1.	ANNEXE A : GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS.....	XVI
2.	ANNEXE B : EXTRAIT DE LA DOCUMENTATION GRAPHIQUE	XVIII
3.	ANNEXE C : EXEMPLE DE CALCUL DES PARAMETRES MECANIQUES	XXII

Liste des Figures

- Figure 1.** Schéma de dispositif méthodologique de la présente recherche, (l'auteure). 12
- Figure 2.** Positionnement épistémologique de la recherche, (l'auteure). _____ 13
- Figure 3.** Structure de la thèse, (l'auteure). _____ 18
- Figure 4.** Organisation du cadre conceptuel de la revue de la littérature (l'auteure). 20
- Figure 5. a.** Situation géographique du bas-Sahara. **b.** Extrait de la figure 5.a : situation géographique de la région du Souf. (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020, traitement : l'auteure). _____ 31
- Figure 6.a.** Vue des micro oasis _Ghouts_ (<https://amazighouedsouf.home.blog/2018/11/02>, consulté le 15/08/2020). **b.** Blocs Gigantesques de la pierre de la Rose des Sables (<http://my3d-city.com>, consulté le 18/08/2020) . _____ 33
- Figure 7.a.** Vue aérienne montrant le paysage culturel du Souf . **b.** Extrait de la figure 7.a montrant le paysage naturel des Ghouts (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020). _____ 34
- Figure 8.** Images du paysage urbain de la région du Souf (<https://histoireislamique.wordpress.com/tag/arabes/> & <https://histoireislamique.files.wordpress.com/2014/10/oued-souf.jpg>, consultés le 13/05/2019). _____ 35
- Figure 9.** Situation géographique des ksour de la région du Souf. (<https://www.nachoua.com/El-Oued/sud-est-algerie.jpg>, consulté le 13/03/2018, traitement : l'auteure). _____ 37
- Figure 10.** Vue aérienne sur la ville de Z'Goum. (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020). _____ 38
- Figure 11.** Vue aérienne sur le Ksar du Kouinine. (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020, traitement : l'auteure). _____ 39
- Figure 12.a.** Vue sur le centre de Laachaache, prise au haut du minaret de la Zaouia de Sidi Salem, El-Oued vers 1905 (<http://alouadesouf.canalblog.com>, consulté le 15/05/2020). **b.** Vue sur le centre de Laachaache en 2012, prise au haut du minaret de la Zaouia de Sidi Salem (Hafiane, 2015) . _____ 40

Figure 13.a. Vue sur le centre de Guemar, début des années 90 (Sébe, 1991).	
b. Vue sur le centre de Guemar (l'auteure, 2019).	41
Figure 14. a. Structure urbaine de Laachaache, El Oued (réalisé par l'auteure, selon (Coté, 2005)).	
b. Structure urbaine de Kouinine (réalisé par l'auteure, selon (Delaval, 1974)).	
c. Structure urbaine de Guemar (réalisé par l'auteure, selon (Mangin & Panerai, 1978)).	42
Figure 15. Stratification historique du Ksar de Guemar : le noyau historique (réalisé par l'auteure, selon (Mangin & Panerai, 1978)).	43
Figure 16. a. L'ancienne porte "Bab El Chargui" (Google Maps, consulté le 5/2/2019).	
b. La nouvelle porte "Bab El Charguia" (l'auteure, 2017).	43
Figure 17. Stratification historique du Ksar de Guemar : extensions urbaines (réalisé par l'auteure, selon (Mangin & Panerai, 1978)).	44
Figure 18. Stratification historique du Ksar de Guemar : La Zaouia Ettidjania (réalisé par l'auteure, selon (Mangin & Panerai, 1978)).	45
Figure 19. Stratification historique du Ksar de Guemar : 3e extension urbaine (réalisé par l'auteure, selon (Mangin & Panerai, 1978)).	46
Figure 20.a. Vue aérienne sur le ksar de Guemar, 1947 (Google Maps, consulté le 5/2/2019)).	
b. Ancienne et nouvelle constructions, Ksar de Guemar (l'auteure, 2019).	47
Figure 21. Schéma explicatif de l'analyse morphologique (L'auteure).	48
Figure 22.a. Morphologie urbaine du noyau historique (L'auteure).	
b. Configuration et regroupement des maisons (L'auteure).	49
Figure 23. Morphologie urbaine du tissu des extensions, (L'auteure).	50
Figure 24. Typologie urbaine des agrégats. a. Agrégat rectangulaire d'une seule ligne de maisons. b. Agrégat rectangulaire de deux lignes jointes de maisons. c. Agrégat : branchement de deux groupements rectangulaires de maisons. d. Agrégat : branchement de plusieurs groupements de maisons dans deux directions, (l'auteure).	50
Figure 25. Typologies de système viaire à Guemar : a. Image d'une ruelle à Guemar. b. Image d'une impasse à Guemar (l'auteure, 2019).	51
Figure 26. Typologies des tissus urbains à Guemar, (l'auteure).	52

Figure 27. Vue aérienne sur Guemar, montrant l'organisation morphologique de maisons (https://poster-gallery.com/ consulter le 05/05/2019).	53
Figure 28. Typologies architecturales des maisons à Guemar. a. Maison traditionnelle à cour de forme carrée avec une ligne des cellules à coupoles continuée. b. Maison traditionnelle à cour de forme carrée avec une ligne des cellules à coupoles discontinuée. c. Maison traditionnelle à cour de forme rectangulaire avec une ligne des cellules à coupoles continuée. d. Maison traditionnelle à cour de forme rectangulaire avec une ligne des cellules à coupoles discontinuée. d. Maison traditionnelle à cour avec portique (l'auteure).	54
Figure 29. a. Voûte en berceau, maison traditionnelle modifiée, Guemar (l'auteure,2019). b. Série des voûtes en berceau, maison traditionnelle modifiée, Guemar (l'auteure, 2019).	55
Figure 30. a. Porte et espace d'entrée, maison traditionnelle, Guemar (prise de l'intérieur de la maison par l'auteure,2019). b. Galerie des arcades donnant sur la cour centrale d'une maison traditionnelle Guemar (l'auteure,2019). c & d. Palmier, l'élément important dans la cour centrale d'une maison traditionnelle, Guemar (l'auteure, 2019).	56
Figure 31. Maisons coloniales, Guemar (l'auteure,2017).	57
Figure 32. Mosquée Sidi Messaoud 1697, Guemar (l'auteure,2019).	57
Figure 33. a. Axonométrie partielle de la Zaouïa Ettidjania montrant sa composition architecturale (l'auteure). b. Façade latérale de la Zaouïa Ettidjania (l'auteure, 2019). c. Rentrée de la Zaouïa Ettidjania (Sofia Nembrini, 2019). d. Élévation intérieure de la Zaouïa Ettidjania (l'auteure).	58
Figure 34. Paysage vernaculaire de la région du Souf. (https://amazighouedsouf.home.blog/2018/11/02/berberes-de-oued-souf/#jp-carousel-13 , consulté le 15/06/2020).	59
Figure 35. a. 3D du système de Ghout. b. Section schématique géologique, la région du Souf. c. Détails de la stratification géologique de la section géologique 1 (Figure 35.b), (l'auteure).	61
Figure 36. a. Image satellites sur les Ghouts (https://satellites.pro , consulté le 15/02/2020), b. Vue aérienne sur les Ghouts (http://www.saravoyages.com/39-El-Oued.htm , consulté le 15/06/2020).	62

Figure 37.a. Blocs de la pierre de la Rose des Sables- Louz-(l'auteure : 2019). b. pierre de la Rose des Sables- Louz- disponible au sol de la région (l'auteure : 2019). c. Blocs de Salsala (l'auteure, 2019).	63
Figure 38. a. Pierre de la Tafza (l'auteure, 2018). b. Fours traditionnels pour brûler la pierre de Tafza, au fauborg de Guemar (l'auteure, 2018). c. Poudre du gypse, pour le mortier de jointoiment, obtenu de la pierre de Tafza, avec des petits morceaux de la pierre non détruite et des fragments de cendre de bois, le chantier de restauration de la Zaouia Ettidjania (l'auteure, 2019). d. Opération de tamisage de la poudre de gypse pour éliminer les cendres de bois et les gros blocs de Tafza non détruite, voir aussi la poudre de gypse après le tamisage, utilisée pour le plâtrage, chantier de restauration de la Zaouia Ettidjania (Giulia Misseri, 2019).	65
Figure 39. Photos prises lors les interviews avec le maitre du chantier restauration de la Zaouia Ettidjania (Sofia Nembrini, 2019).	66
Figure 40. Positionnement des maisons étudiées. (https://satellites.pro , consulté le 15/02/2020, traitement : l'auteure).	68
Figure 41.a. Images des maisons en état de ruines étudiées. B. Maison en bon état étudiée. (l'auteure, 2019).	69
Figure 42. a. Photo prise lors l'opération d'un relevé manuel in situ d'une maison en ruine (l'auteure, 2019). b. Dessin des relevées effectuée in situ. c. Photo prise lors l'opération d'un relevé d'une maison par scanner laser 3D (l'auteure, 2019). d. 3D d'une maison relevé par scanner laser 3D (l'auteure).	69
Figure 43.a. Extrait des dossiers graphiques produit à partir des relevés manuelles (Alessia Lico, Stefano Moscini, Sofia Nembrini, Giovanni Gubitosa, Giulia Misseri et Cheima Azil).b. Extrait des dossiers graphiques produits à partir d'un relevé par scanner laser (l'auteure).	71
Figure 44. Extrait d'un plan et coupe schématiques d'une maison, une cellule à coupole (l'auteure).	73
Figure 45.a. Base d'un mur construite avec la pierre de Salsala (l'auteure, 2019). b. Grands blocs de la pierre de la Rose des Sables (l'auteure, 2019).	74
Figure 46. Dessin explicatif de la fondation en Rose des Sables : plan, section et axonométrie (l'auteure).	75

Figure 47. Dessin explicatif du mur et contrefort en Rose des Sables : plan, section et axonométrie (l'auteure).	77
Figure 48. a. Maison rurale avec des contreforts, Oued Souf (l'auteure, 2018). b. Fonctionnement de contreforts, Rôle de mur de la maison citoyenne (l'auteure). c. Contreforts donnant sur la ruelle. d. Contreforts donnant sur la cour centrale (l'auteure, 2019)	79
Figure 49. Texture irrégulière d'un mur en blocs de Rose des Sables (l'auteure, 2018). b. Mur en rose des sables, partie inférieure avec une finition de plâtre. (l'auteure, 2019).	80
Figure 50. a. Mur de la Zaouia Ettidjania lors la reconstruction, avec des grands blocs de la pierre de la Rose des Sables (l'auteure, 2018). b. Contreforts dans la façade externe de la Zaouia Ettidjania (l'auteure, 2019). c. Pilier croisé en Rose des Sables, Zaouïa Ettidjania, Guemar. d. Pilier octogonal en Rose des Sables, Zaouïa Ettidjania, Guemar. e. Colonne en Rose des Sables, Zaouïa Ettidjania, (l'auteure, 2019).	81
Figure 51. Maçonnerie d'un mur en Rose des Sables et mortier de gypse : a. avant la reprise du mortier ; b. après la reprise du mortier (l'auteure, 2019).	82
Figure 52. Dessins et photos explicatifs des ouvertures, portes et fenêtres, de la maison Soufi : plan, élévation, restitution photogrammétrique et images (l'auteure).	83
Figure 53. Dessins et photos explicatifs des arcades de la maison Soufi : plan, élévation, 3D et images (l'auteure).	84
Figure 54. Poutre métallique à la place d'un arc : a. vue intérieure ; b. Vue extérieure (l'auteure : 2019).	85
Figure 55. a. Arc brisé, arcades de la salle hypostyle de la mosquée, Zaouïa Ettidjania (l'auteure, 2019). b. Arc surbaissé, Zaouïa Ettidjania (Giovanni Gubitosa, 2019). c. Arcades en anse de panier (Sofia Nembrini, 2019). d. Différents types d'arcades, galerie Zaouïa Ettidjania (l'auteure, 2019). e. Arcades brisés, façade restituée de la Zaouïa Ettidjania (Islem Dali).	86
Figure 56. Système de couverture utilisé dans la région du Souf (l'auteure).	88
Figure 57. Dessin explicatif de la coupole traditionnelle en Rose des Sables (l'auteure).	90
Figure 58. Dessin explicatif des sous typologies de la coupole traditionnelle en Rose des Sables (l'auteure).	93

Figure 59. <i>a. Processus de construction de la coupole coloniale. b. Coupoles coloniales, Guemar (l'auteure, 2018).</i>	94
Figure 60. <i>Coupole octogonale : a. Vue extérieur sur la coupole ; b. Restitution panoramique du dôme de l'école religieuse Zaouia Ettidjania (l'auteure,2019).</i>	95
Figure 61. <i>Coupole sphérique : a. Vue extérieur sur la coupole ; b. Trompe de la coupole. c. Décoration de la coupole octogonale, Zaouïa Ettidjania (l'auteure, 2019).</i>	96
Figure 62. <i>Coupoles des mausolées, Guemar (l'auteure, 2019).</i>	97
Figure 63. <i>a. Voûtes en berceau, maisons coloniales, Guemar. b. Voûtes en berceau et voûte croisée, maison traditionnelle, Guemar (l'auteure, 2018&2019).</i>	98
Figure 64. <i>Toiture : plancher plats et pyramide, Zaouïa Ettidjania, Guemar (l'auteure,2019).</i>	98
Figure 65. <i>Processus de construction de la cellule à coupole en Rose des Sables (l'auteure).</i>	99
Figure 66. <i>Maillage d'une coupole relevée par scanner laser 3D, montrant l'irrégularité de la forme (l'auteure).</i>	100
Figure 67. <i>a. Vue sur le centre de Guemar, début des années 90 (Sébe, 1991). b. Vue sur le centre de Guemar (l'auteure, 2019).</i>	102
Figure 68. <i>a. Restauration du monument historique Zaouia Ettidjania avec des matériaux industriels, (l'auteure, 2019). b. Réparation des fissures au niveau de la coupole par le ciment, Guemar (l'auteure, 2018). c. Maçonnerie de remplissage (en briques creuses), Guemar (l'auteure, 2019).</i>	104
Figure 69. <i>a. Modèles de fissures récurrentes dans les coupoles, parois et arcs (l'auteure). b. Vue de bas sur l'intrados des coupoles, nuage de point (l'auteure).</i>	106
Figure 70. <i>a. Fissure au coin et au diagonal de la coupole (l'auteure, 2019). b. Fractures au coin et au long de diagonales de la coupole (l'auteure, 2019). c. Fracture à l'intersection des parois et au long du diagonal de la coupole (l'auteure,2019).</i>	107
Figure 71. <i>Fractures traversantes et lézards au coin et au long de diagonales de la coupole (Luisa Rovero, 2019).</i>	107
Figure 72. <i>Mesurément de l'épaisseur des fractures à partir du relevé 3D avec le scanner laser : a. à partir du nuage de point ; b. dans l'image. (L'auteure). c. Nuage de point du relevé laser scanner 3D montant l'intrados de la coupole et la profondeur des</i>	

<i>fractures. d. Mesurément de la profondeur des fractures à partir du nuage de points (Cheima Azil & Boualem Djebri).</i>	108
Figure 73. <i>Fracture verticale dans la zone centrale de la paroi et la coupole (Luisa Rovero, 2019).</i>	109
Figure 74. <i>a & b. Fissure et fracture verticale au niveau de l'arc de la galerie de la maison (l'auteure, 2019 & Sofia Nembrini, 2019). c. Mesurément de l'épaisseur de la facture au niveau de l'arc de liaison entre les deux cellules à coupoles (L'auteure). d. Fracture verticale traversante au niveau de l'arc de liaison entre les deux cellules à coupoles(l'auteure).</i>	110
Figure 75. <i>Fissure superficielle (Luisa Rovero, 2019).</i>	111
Figure 76. <i>Maisons endommagées à cause de l'effondrement de ses éléments, Guemar (l'auteure, 2019).</i>	111
Figure 77. <i>a. Plan montrant le jointement des deux fractures au long du diagonale de la coupole (l'auteure). b. Plan montrant l'effondrement de la moitié de la coupole au niveau de diagonale(l'auteure). c & d. Effondrement de la moitié de la coupole au niveau de de diagonale et les parois soutenant cette partie, Guemar (l'auteure,2019).</i>	112
Figure 78. <i>a. Plan montrant le jointement des trois fractures : deux fractures aux coins des deux coupole (point 1 et 3), et la fracture verticale au niveau de l'arc de liaison entre les deux cellules, (point 2), (l'auteure). b. Plan montrant l'effondrement des deux parties des deux coupoles à cause de jointement des fractures selon Figure 87.a (l'auteure). c. Vue 3D de nuage de points montrant l'effondrement des deux parties des deux coupoles à cause de jointement des fractures selon figure 78.a (Cheima Azil & Boualem Djebri). d. Image des effondrements des deux parties des deux coupoles à cause de jointement des fractures selon la figure 78.a (l'auteure, 2019).</i>	113
Figure 79. <i>a. Image des effondrements des deux parties des deux coupoles à cause de jointement des fractures selon la figure 78.a (l'auteure, 2019). b. Effondrement des deux parties des deux coupoles passant par la moitié de l'arc de liaison (Giovanni Gubitosa, 2019).</i>	114
Figure 80. <i>a. Plan montrant l'intersection de la fracture au coin de la coupole le long de la moitié de sa diagonale et la fracture verticale au centre de l'arc de liaison prolongeant dans la moitié de la coupole (l'auteure). b. Plan montrant l'intersection de</i>	

la fracture au coin de la coupole le long de la moitié de sa diagonale et la fracture verticale au milieu de la paroi qui se prolonge au centre de la coupole (l'auteure). c. Plan montrant l'effondrement d'un quart de la coupole (l'auteure). d. Vue extérieure d'une cellule avec une coupole avec son quart effondré (l'auteure,2019). e. Vue 3D de nuage de point en haut d'une coupole avec son quart effondrée (l'auteure). f. Vue 3D de nuage de point à l'intérieur d'une cellule et en bas d'une coupole avec son quart effondré (l'auteure). g. Vue à l'intérieur d'une cellule et en bas d'une coupole avec son quart effondré (l'auteure, 2019). _____ 115

Figure 81. a. Plan montrant le jointement des deux fractures aux coins adjacents de la coupole traçant les moitiés de ses diagonales (l'auteure). b. Plan montrant l'effondrement d'une partie de la coupole selon deux moitiés des diagonales (l'auteure). c & d. Effondrement d'une partie de la coupole selon deux moitiés des diagonales, Guemar (l'auteure, 2019). _____ 116

Figure 82. a. Plan montrant la fracture centrale au niveau de la paroi (l'auteure). b. Plan montrant l'effondrement de la paroi sous forme des trous (l'auteure). c & d. Effondrement sous forme des cavités au niveau centrale des parois, Guemar (l'auteure, 2019 & 2018). _____ 117

Figure 83. a. Maillage triangulé d'une cellule à coupole avec un mur déformé. b. Quantification de l'inclinaison d'un mur à partir d'une section au niveau du maillage triangulé d'une cellule à coupole (l'auteure). _____ 118

Figure 84. a& b. Effritement du plâtre protégeant la maçonnerie au niveau de la base de la paroi, Guemar (l'auteure, 2019). c. Effritement du plâtre et du mortier de jointoiment de la maçonnerie au niveau de la base de la paroi, Guemar (l'auteure, 2019). d. Section montrant l'effritement du plâtre et du mortier au niveau de la base de la paroi (l'auteure). e. Effritement du plâtre protégeant la maçonnerie au niveau de la coupole, Guemar (l'auteure,2019). f. Effritement du plâtre et de la maçonnerie créant des trous au niveau de la base de la paroi, Guemar (l'auteure, 2019). _____ 119

Figure 85. a& b. Gonflement, détachement et érosion du plâtre dans la couche extérieure des coupoles (l'auteure, 2019). _____ 120

Figure 86. Moisissures et efflorescences : a. Au niveau de la base des murs ; b & c. Au niveau de l'intrados de la coupole (l'auteure, 2019). _____ 121

- Figure 87.a.** Mécanisme résistant dans la coupole en Rose des Sables. **b.** Poussées concentrées en clé dans les arcades principales du mécanisme résistant de la coupole en Rose des Sables, déduit selon le mécanisme résistant de la voûte en arc de cloître (réalisé par l'auteure, selon (Borri&Bussi, 2011). _____ 122
- Figure 88.a.** Fissuration et décollement des broches dans la coupole en Rose des Sables suite à la flexion hors du plan des murs. **b.** Evolution de la cinématique d'endommagement suite à l'effondrement de la broche frontale : fissuration de la diagonale (réalisé par l'auteure, selon (Borri & Bussi, 2011). _____ 123
- Figure 89.** Caméra d'imagerie thermique utilisée, FLIR T460 (Vicario, 2017). ____ 125
- Figure 90.** Utilisation de la caméra d'imagerie thermique pour mesurer la température des parois de la construction : **a.** à l'extérieur. **b.** à l'intérieur (l'auteure, 2019). __ 126
- Figure 91. a.** Infiltration d'eau à travers la fissure au niveau de la coupole, Guemar (l'auteure, 2018). **b.** Couverture en plastique pour la coupole utilisée par les habitants, à cause de l'infiltration d'eau, Guemar (l'auteure, 2018). _____ 128
- Figure 92. a.** Échantillons des pierres en Rose des Sables (l'auteure, 2018). **b.** Élaboration des données des échantillons (l'auteure, 2018). _____ 132
- Figure 93.** Échantillons constitués des pierres de la Rose des Sables sélectionnées et cataloguées comme suit : **a.** Échantillon DR1 ; **b.** Échantillon DR2 ; et **c.** Échantillon DR3. **d.** Échantillon de pierre de la Rose des Sables avec résidus de mortier prélevés sur des bâtiments endommagés. **e.** Échantillon TS, Tafza, la pierre utilisée pour produire le mortier. **f.** Échantillon MP, le mortier de jointement prélevé. (l'auteure, 2018). __ 133
- Figure 94.** Résultats minéralogiques et pétrographiques de l'échantillon TS, la pierre de Tafza : **a.** Spectre XRD. **b.** Coupe transversale de l'échantillon. **c.** Image en coupe mince de l'échantillon observée au microscope optique en lumière transmise polarisée (Azil Cheima, Fratini Fabio). _____ 137
- Figure 95.** Résultats minéralogiques et pétrographiques de l'échantillon DR3, pierre de la Rose des Sables avec le mortier : **a.** Spectre XRD de l'échantillon DR 3-portion avec des cristaux de gypse (la Rose des Sables). **b.** Spectre XRD de l'échantillon DR3-portion avec mortier. **c.** Coupe transversale de l'échantillon DR3 : en bas à gauche le cristal de gypse (Rose des Sables), en haut à droite le mortier. **d.** Image en coupe mince observée au microscope optique en lumière transmise polarisée. En bas se trouve le

mortier, en haut le cristal de gypse qui comprend des grains arrondis de quartz et de calcite (Azil Cheima et Fratini Fabio). _____ 139

Figure 96. Résultats minéralogiques et pétrographiques de l'échantillon MP, le mortier : a. Spectre XRD de l'échantillon Spectre XRD. b. Coupe transversale de l'échantillon. c & d. Images en coupe mince de l'échantillon observée au microscope optique en lumière transmise polarisée (Azil Cheima et Fabio Fratini). _____ 141

Figure 97. a. Échantillons obtenus par découpe d'échantillons DR1 et DR2, pour les essais de compression uniaxiale et les essais de traction indirecte ; b & c. Essai de compression uniaxiale sur un spécimen représentatif ; d & e. Essai de traction indirecte sur un spécimen représentatif, (l'auteure, 2018). _____ 143

Figure 98. Spécimen avec des surfaces recouvertes d'une suspension de gypse, montrant aussi la porosité de la pierre de la Rose des Sables, (l'auteure, 2018). ____ 144

Figure 99. Diagrammes contrainte-déformation enregistrés lors des essais de compression uniaxiale : a) Échantillons obtenus à partir de l'échantillon DR1 ; b) Échantillons obtenus à partir de l'échantillon DR2, (l'auteure). _____ 147

Figure 100. a & b. Tests par pénétromètre pour le mortier de gypse de la maçonnerie en Rose des Sables, (Cheima Azil et Luisa Rovero, 2019). _____ 150

Figure 101. Poudre de gypse dans le site de restauration du monument historique Zaouia Ettidjania (l'auteure, 2019). _____ 152

Figure 102. Bloc de coffrage de forme parallélépipédique, dimensions 34x10x10 cm³, (l'auteure, 2020). _____ 153

Figure 103. Étapes de préparation de l'échantillon M de la maçonnerie en Rose des Sables à l'échelle 1 : 2 dans le coffrage (l'auteure, 2020). _____ 154

Figure 104. Étapes de préparation d'échantillon de maçonnerie en Rose des Sables M' à l'échelle 1: 5 dans le coffrage (l'auteure, 2020). _____ 155

Figure 105. a. Échantillon parallélépipédique pour le test de flexion trois points. b. Spécimen cubique pour le test de compression uniaxiale. c. Spécimen cylindrique pour le test de traction indirect (l'auteure, 2020). _____ 157

Figure 106. a & b. Essai de flexion trois points, avant et après, sur une éprouvette représentative de la maçonnerie en Rose des Sables, (l'auteure). c. Schéma d'explication de la géométrie et des données des éprouvettes de flexion trois points utilisée (réalisé par l'auteure selon (UNI EN 1015-11, 2007)). _____ 158

Figure 107. Diagrammes de charge / déplacement enregistrés lors des essais de flexion trois points pour : a. les échantillons de maçonnerie M à l'échelle 1 : 2 ; b. les échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 5 (l'auteure).	159
Figure 108. a. Test de compression uniaxiale (l'auteure, 2020). b. Diagrammes contrainte-déformation enregistrés lors des essais de compression uniaxiale pour : a. les échantillons de maçonnerie M à l'échelle 1 : 2 et les échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 5, (l'auteure).	160
Figure 109. Essai de traction indirecte (l'auteure, 2020).	162
Figure 110. Géométrie du modèle de coupole et les conditions aux limites (l'auteure).	169
Figure 111. Résultat de l'analyse linéaire FEM : contrainte dans la surface moyenne de la coupole a. le long des parallèles ; et b. le long des méridiens (l'auteure).	170
Figure 112. Ligne de poussée de la tranche de la coupole obtenue selon la méthode proposée dans (Galassi et Tempesta 2019), (Cheima Azil).	171
Figure 113. Résultat de l'analyse non linéaire FEM : Distribution des déformations de fissures dans la surface moyenne de la coupole.	173
Figure 114. a. Relevé de la maison (entourée par la ligne rouge) par balayage scanner avec plusieurs scans (positionnement des scans en cercle verte). b. Sélection des deux cellules à coupoles pour l'analyse (l'auteure).	174
Figure 115. a. Modèle de maillage triangulé obtenu avec le logiciel MeshLab. b. Texture rugueuse de la surface du maillage (texture du plâtre) avant la simplification. c. Texture lisse de la surface du maillage après la simplification. d. Simplification du maillage avec le logiciel Instant Meshes (l'auteure).	175
Figure 116. a. Trou de la fissure au niveau maillage du modèle. b. Résultat final du modèle de maillage dans le logiciel Rhinoceros.7. c. Création des surfaces NURBS à partir du modèle de maillage par le plugin RhinoResurf. d. Création du Solide à partir du modèle des surfaces NURBS simplifiées, Rhinoceros.7 (l'auteure).	176
Figure 117. Modèle numérique du maillage sur DIANA FEA, (l'auteure).	179
Figure 118. Diagramme de contour pour les déplacements dans la direction Z pour le poids mort, (l'auteure).	180

Figure 119. Graphiques de contour des contraintes principales de Cauchy, coupes verticales passant par les médianes de la coupole : a dans le sens transversal. b. dans le sens longitudinal, (l'auteure).	182
Figure 120. Tracé de contour des contraintes principales de Cauchy, coupe verticale dans la direction diagonale de la coupole, (l'auteure).	183
Figure 121. Tracé de contour des contraintes principales de Cauchy, coupe horizontale à la base des coupoles, (l'auteure).	184
Figure 122. Diagramme de tension des principales composantes de contrainte dans le plan, (l'auteure).	185
Figure 123. Diagrammes de tension des composantes de contrainte principales dans le plan, coupes verticales dans les directions transversale et longitudinale, à travers les médianes de la coupole, (l'auteure).	186
Figure 124. Diagramme de tension des composantes de contrainte principales dans le plan, coupe verticale dans la direction diagonale de la coupole, (l'auteure).	187
Figure 125. Diagramme de tension des composantes de contrainte principales dans le plan, coupe horizontale à la base des coupoles, (l'auteure).	188
Figure 126. Résultat de l'analyse non linéaire FEM: Distribution des déformations de fissures dans le modèle: a. pour le pas de charge de 0,84 ; b. pour l'échelon de charge de 0,93 11. c. pour l'échelon de charge de 1,17, (l'auteure).	191
Figure 127. Résultat de l'analyse non linéaire FEM: les largeurs de fissures dans le modèle pour le pas de charge a: 0,93g; b. 1,13, (l'auteure).	191
Figure 128. Résultat de l'analyse non linéaire FEM : a. Répartition des fissures dans le modèle pour l'échelon de charge 0,9g. b. Largeurs des fissures dans le modèle pour l'échelon de charge 0,9 g (l'auteure).	192
Figure 129. Organigramme conceptuelle du le processus global de diagnostic élaboré, et les perspectives proposées pour le travail (l'auteure).	203

Liste des tableaux

Tableau 1. Dimensionnement des cellules à coupoles (l'auteure).	72
Tableau 2.1. Dimensionnement des cellules à coupoles, montrant la variation dans la hauteur des coupes, selon cette variation le tableau a été divisé en deux tableaux (tableau a et b). a. Dimensionnement des cellules à coupoles de la première sous typologie. b. dimensionnement des cellules à coupoles de la deuxième sous typologie (l'auteure).	92
Tableau 3. Résultats obtenus par l'image thermique (l'auteure).	127
Tableau 4. Résultats des tests physiques effectués par pycnomètre Hg (l'auteure).	135
Tableau 5. Résultats des tests de compression uniaxiale pour les échantillons DR1 et DR2 (l'auteure).	146
Tableau 6. Résultats de l'essai de traction indirecte (l'auteure).	148
Tableau 7. Résultats des tests par pénétromètre pour le mortier de gypse (l'auteure)	150
Tableau 8. Données sur la composition des échantillons (l'auteure).	155
Tableau 9. Résultats des essais de flexion trois points pour la maçonnerie en Rose des Sables (l'auteure).	158
Tableau 10. Résultats des tests de compression uniaxiale de la maçonnerie en Rose des Sables (l'auteure).	161
Tableau 11. Résultats des essais de traction indirecte (l'auteure).	162
Tableau 12. Estimation du module d'élasticité des échantillons des maçonnerie en Rose des Sables par la formule des mélanges (l'auteure).	163
Tableau 13. Propriétés physiques et mécaniques de la maçonnerie en Rose des Sables utilisées pour la modélisation FE (l'auteure).	178

Introduction

1. Préambule

La dégradation est le destin inévitable des constructions anciennes constituant une grande partie du patrimoine, elle n'épargne pas l'architecture vernaculaire et plus précisément celle du *Sahara* en Algérie. Cette dernière est représentée dans une gamme de formes variées par ses typologies à savoir : ses formes urbaines, architecturales et structurelles. C'est le résultat d'un savoir-faire local, en exploitant les matériaux locaux de manière ingénieuse pour concevoir des techniques constructives. Ces dernières ont donné naissance à des structures appropriées aux conditions anthropiques, culturelles, naturelles, et climatiques avec la prise en compte de la vulnérabilité locale. Ces typologies structurelles contiennent d'amples connaissances à découvrir et à apprendre.

L'architecture vernaculaire du *Sahara* constitue un grand pourcentage du patrimoine algérien. Ainsi, son paysage urbain constitue un élément d'identité culturelle. Elle occupe une place centrale dans l'affectation et la fierté de chacun. Sa conservation et sa mise en valeur ne sont alors plus à justifier. La dégradation des éléments architecturaux majeurs dans ces tissus urbains génère également la dégradation et la dévalorisation du paysage urbain. Par conséquent, dans la région du *Souf*, la dégradation des coupoles, qui constitue un élément du système de couverture majeur et original de cette région, a des effets pervers sur toute l'image paysagère originale que dessinent ces coupoles. En effet, il est nécessaire d'étudier ces éléments pour les conserver et sauvegarder le paysage culturel de la région.

En outre, la région du *Souf* est connue par la présence de trois noyaux historiques à savoir : *Zgoum*, *Guemar* et *El Oued* dont les mosquées remontent au XVI^e siècle (Coté, 2006). Ces villages sont connus par l'utilisation des coupoles construites avec le matériau local, la pierre de la *Rose des Sables*, appelée localement *Louz*. Ensuite à l'époque coloniale, l'administration française a généralisé l'utilisation des coupoles dans les nouvelles constructions. Cette époque a connu l'introduction de la voûte en berceau. Donc, Le paysage du *Souf* est dessiné par la stratification des coupoles construites avec la pierre de la *Rose des Sables* pendant plusieurs périodes. Pour autant ces dernières qui représentent une grande partie des centres historiques et des constructions rurales sont endommagées.

Par ailleurs, actuellement, nos pratiques architecturales et constructives se sont aussi développées. L'usage de l'outil informatique pour comprendre le fonctionnement des structures des œuvres patrimoniales, ainsi que les différents outils utilisés dans la caractérisation des matériaux ont fait leur démonstration d'une clarté et d'un résultat remarquable. En effet, les méthodes d'analyses structurelles et de diagnostic de bâti ancien ont aussi connus ce développement. Dès lors, dans cette recherche il est proposé de mener un travail, qui fera la combinaison entre deux thématiques : la conservation des coupoles du *Souf en Rose des Sables*, et, les différentes méthodes d'analyse du bâti ancien à l'image de la modélisation des éléments structurels.

2. Constat

L'intérêt de cette thématique que nous désirons développer est d'apprendre davantage sur l'état de dégradation structurelle et de vieillissement de ces éléments de recouvrement : les coupoles en *Rose des Sables*, car, elles participent à la stabilité des constructions, et leurs endommagements procréent logiquement des désordres constructifs. Ces derniers se développent dans tous les éléments constructifs porteurs de ces coupoles. Ils sont également accentués par le manque d'entretien, accompagné de l'effet des aléas anthropologiques et naturels. De plus, ces dégradations ne dévalorisent pas uniquement les unités patrimoniales mais aussi le paysage urbain à sa large échelle. Ces dégradations mettent ce patrimoine en péril de disparition.

Plusieurs causes structurelles provoquent le processus de dommage de ces coupoles. Mais également, certaines causes reviennent à la qualité de la mise en œuvre, à l'image des défauts d'exécution ainsi que les problèmes d'étanchéité. De plus, l'autre cause est la succession des agressions environnementales, qui entraînent une transformation physico-chimique et mécanique des matériaux. Cette transformation conduit à une détérioration superficielle ou profonde (désagrégation, fissuration, dissolution). A ce propos, la connaissance de ces éléments est insuffisante, surtout celle des aspects constructifs qualitatifs et quantitatifs des différents éléments constituant la structure principale. Cette connaissance est importante dans la définition de ces causes de dégradations, et joue un rôle dans l'entretien et la sauvegarde de ce patrimoine. Au-delà des dégradations de ce patrimoine matériel (architectural bâti), se joint le rejet d'un patrimoine immatériel : la perte des savoir-faire ou l'art de bâtir (Belhadj, 2011). Ce

patrimoine immatériel est constitué des techniques, des procédés de constructions et d'utilisation des matériaux locaux.

L'autre intérêt se porte sur les méthodes d'analyse des structures, et leurs exploitations dans la connaissance et le diagnostic du bâti ancien. L'atout de ces méthodes est d'évaluer le fonctionnement structurel des constructions anciennes pour offrir une voie préliminaire dans l'étape de diagnostic des structures. En effet, cela donne la possibilité d'établir des scénarios liés à la dégradation des structures et l'origine des pathologies structurelles. L'enjeu à travers ce travail est de mettre plusieurs méthodes au service du diagnostic et de l'étude de la coupole en *Rose des Sables* de la région du *Souf*.

3. Problématique

La culture constructive ancienne du *Souf* connaît un intérêt dans le milieu scientifique, Plusieurs études ont d'ailleurs essayé de comprendre l'art de bâtir de cette région. Cet art de bâtir a donné naissance à un paysage étonnant, particulier et unique par l'utilisation de la technique de construction « la coupole » dans toute bâtisse (Coté, 2006). Ses facteurs de naissance sont l'adaptabilité à l'environnement et l'influence socioculturelle. Ce dernier justifie par la filiation orientale de cette culture constructive (Coté, 2005). A l'égard du facteur de l'adaptabilité à l'environnement, il revient à la disponibilité des matériaux locaux, la *Rose des Sables* et le gypse produit de la pierre de *Tafza*, avec lesquels les coupoles sont construites.

Ces coupoles présentent un système constructif efficace relativement aux conditions climatiques de la région. Pourtant, il n'est pas bien saisissable malgré son importance. Les coupoles, ainsi construites, constituent un système structurel, qui leur fournit une certaine stabilité et endurance, reste à ce jour une question ouverte. Ceci revient à la connaissance incomplète, surtout celle des techniques constructives approfondies. Par ailleurs, plusieurs travaux d'ordre historique, et sur les performances énergétiques ont été faites sur les constructions du *Souf*, mais les aspects d'ordre technique et constructif restent moins étudiés. Les études des aspects constructifs ont une importance pour préserver ces constructions.

D'autre part, des travaux ont ciblé les méthodes d'analyse structurelle des coupoles dans une perspective d'établir un diagnostic structurel, tel que l'étude de comportement

des coupoles par la modélisation et la simulation numériques. Ces travaux sont essentiellement basés sur l'analyse des coupoles anciennes en maçonnerie (Coste Anne, 1997; Drioueche, 2012; Mecca et al., 2009). Parmi ces études sur les coupoles en maçonnerie, il y a des études sur les coupoles à encorbellement de l'architecture vernaculaire. En particulier, le travail d'analyse structurelle et de diagnostic, dans le projet « *Earthen Dome and habitat in northern Syria. An architectural tradition shared by East and West* », qui contient plusieurs démarches et méthodes d'analyses structurelles pour les coupoles en terre. Ces méthodes ont permis de connaître la construction et comprendre les défaillances structurelles et leurs origines. En conséquence, cette étude se compose de plusieurs méthodes d'analyses complémentaires. Chaque méthode traite un aspect différent à savoir : étude des aspects architecturaux et constructifs, l'étude des matériaux et l'analyse du comportement structurel des coupoles. En somme, ces plusieurs études et méthodes aident à la compréhension du processus de dégradation, selon plusieurs paramètres.

Les travaux précédents soutiennent la possibilité de l'aboutissement de la problématique de la présente recherche, et son inscription dans un débat et un cursus académique de recherche pluridisciplinaire fusionnant l'architecture, l'histoire et l'ingénierie. Les simples principes de constructions des coupoles en *Rose des Sables* ne retracent aucune théorie plus au moins savante. Plusieurs paramètres dû à ces dégradations mettent ce patrimoine en péril de disparition, en plus de l'absence d'un outil de diagnostic structurel. Donc, il est nécessaire de trouver les causes de dégradations pour sauver ces coupoles. Par conséquent, on peut poser la problématique suivante :

Comment peut-on exploiter les paramètres ayant causé les dommages afin de pouvoir dégager une démarche méthodologique de diagnostic structurel spécifique aux coupoles en Rose des Sables ?

Cette recherche se base sur une étude paramétrique en exploitant les paramètres ayant causé les dommages, afin de pouvoir dégager une démarche méthodologique de diagnostic aux coupoles en *Rose des Sables*, à travers l'étude structurelle des coupoles.

Les questions sous-jacentes

Pour répondre à la problématique et formuler une démarche méthodologique de diagnostic à ces coupoles, il est obligatoire de répondre aux questions suivantes :

Quelles sont les techniques utilisées dans la culture constructive de la région du *Souf*?

Quelles sont les typologies architecturales des coupoles existantes en *Rose des Sables* ?

Quelles sont les paramètres causant la dégradation de ces coupoles ?

4. Objectifs

Les objectifs liés aux questionnements sont :

- la contribution à la connaissance de la culture constructive du *Souf*.
- la détermination des typologies architecturales des coupoles en *Rose des Sables*.
- la détermination et sélection des paramètres structurels et les facteurs de dégradation de ces coupoles.

Ces objectifs répondent à la problématique de la présente recherche, et elles permettent d'atteindre l'objectif principal de la recherche à savoir :

La formulation d'une démarche méthodologique de diagnostic structurel, à travers la mise en place d'un outil d'aide au diagnostic spécifique aux constructions à coupole en *Rose des Sables*.

5. Méthodologie et positionnement épistémologique

a) *Dispositif méthodologique*

La mise en place d'une démarche méthodologique de diagnostic, adaptée aux contraintes des coupoles en *Rose des Sables*, ne dépend pas d'un outil unique, mais d'une démarche intégrant plusieurs techniques complémentaires (Figure 1). En effet, le caractère pluridisciplinaire de notre recherche mène à conjuguer les méthodes suivantes :

1. L'étude historique

L'étude historique permet en premier lieu de définir l'aire d'étude, et puis identifier la classification typologique des coupoles. Cela, à travers la stratification historique de l'aire d'étude, qui permet d'identifier le développement du centre historique choisi à travers le temps. De ce fait, il sert aussi à connaître les typologies des coupoles de différentes périodes. En conséquence, cette étude historique, urbanistique avec l'observation *in situ* sert à définir les tissus contenant des constructions de la même période, et donc de la même typologie de coupole. Cette étude aboutit à un choix de cas d'étude de la typologie architecturale de coupole dominante et la plus vulnérable à la dégradation.

L'étude historique se base sur plusieurs sources, à savoir : les sources et les travaux historiques de la région du *Souf*. Pour la classification typologique, il est nécessaire de faire des relevés métriques des constructions à coupole. Ces derniers servent à définir les tracés géométriques des coupoles pour les classer, dans l'étude suivante, à savoir l'étude des aspects architecturaux et constructifs.

2. L'étude architecturale et constructive et investigations in situ

L'étude des aspects architecturaux et constructifs sert à connaître la construction et ses différentes composantes. Aussi, l'analyse technique de la construction constitue en l'analyse du système de connaissances constructives tacites locales. Elle est basée sur l'observation directe et l'étude des éléments de construction, sur l'identification et la caractérisation des matériaux, sur la technique de construction et l'identification des processus de construction.

Le projet de documentation est particulièrement important dans ce cas, car pour diverses raisons ce patrimoine se retrouve aujourd'hui dans un état critique et précaire. Il est donc primordial de collecter une documentation aussi complète que possible : des méthodes géomatiques peuvent être appliquées pour générer des enregistrements permanents à partir desquels des informations peuvent être extraites, à l'exemple de la donnée spatiale. La nécessité de fournir de la documentation à différentes échelles souligne l'utilité d'intégrer les différents niveaux de détail dans le même projet.

Pour réaliser cette étude, les investigations *in situ* représentent une démarche importante accompagnant les différentes phases de la présente recherche. En effet, il

est important de réaliser plusieurs relevés détaillés des constructions. Ces derniers donnent une vision sur les éléments constituant la construction et la relation entre eux. Le relevé permet aussi de faire les tracés géométriques de différentes typologies des coupes pour l'analyse géométrique de ces formes. La documentation métrique du patrimoine bâti nécessite une compréhension approfondie et une observation attentive du site et une restitution graphique appropriée des données collectées, ainsi qu'une quantification dimensionnelle obtenue par le moyen d'instruments appropriés.

Ainsi, un ensemble des méthodes de levés géomatiques a été utilisé. D'abord, des méthodes de relevés directes et topographiques ont été faites sur des maisons et des ruines des maisons, puis, ils ont été dessinés à l'aide du logiciel *Autocad* d'*Autodesk*. D'autres méthodes sophistiquées d'acquisition ont été utilisées telles que la photogrammétrie, le balayage laser en utilisant le scanner laser 3D, *FARO Focus3D* (FARO, 2013), pour élaborer une modélisation numérique et un modèle 3D. Le balayage laser contenant un nuage de points a été traité et enregistré avec le logiciel *Recap Pro* de *Autodesk* (Recap Pro Autodesk, 2018). Ensuite, à partir du nuage de points déjà enregistré, le logiciel *Meshlab* (MesLab, 2016) a permis de créer le maillage du modèle 3D. De plus, une première opération de simplification du modèle 3D a été faite avec le logiciel *Instant Mesh* en réduisant le nombre des éléments du maillage. Aussi, le logiciel *Rhinoceros 3D.7* (Rhinoceros 3D, 2019) a servi à simplifier le maillage et remplir les parties vides.

Durant la prospection sur terrain, les enquêtes avec les anciens maîtres maçons de la région permettent de répertorier et décrire les matériaux utilisés, ainsi que les processus de construction des différents éléments constructifs. Cela permet de créer la documentation graphique nécessaire sur les techniques de constructions utilisées. De plus, Un reportage photographique est nécessaire pour documenter la typologie constructive, mais également pour identifier les différentes pathologies de la construction afin d'élaborer le diagnostic adéquat. En outre, il est essentiel d'élaborer un échantillonnage de ces matériaux de construction pour les exploiter dans la prochaine étude, qui est l'étude structurelle.

3. L'étude structurelle et diagnostic

L'analyse structurelle repose sur la compréhension profonde des éléments de construction et de leurs schémas statiques, l'identification et le diagnostic des

pathologies structurelles, et une analyse interprétative archéo-technique de la construction. Le but de cette analyse est la compréhension et l'identification des caractéristiques structurelles de la culture constructive, des pathologies structurelles et des échecs.

Le reportage photographique et les relevés effectués *in situ* permettent d'élaborer le diagnostic structurel, en repérant les pathologies observées, ensuite, en les classifiant selon leur nature. Certains instruments sont utilisés lors de la prospection *in situ*. La caméra d'imagerie thermique sert à vérifier l'existence de cette humidité dans les constructions par mesure du rayonnement infrarouge émis par ces constructions pour déterminer leur température. Après ce test, une évaluation qualitative de la présence de l'humidité se fait à la base de la lecture des images prises.

L'étude structurelle du cas d'étude permet d'identifier ses paramètres de dégradation. Selon les études sur les constructions à coupole, plusieurs raisons sont nécessaires pour la construction de la connaissance du système structurel, de son fonctionnement et de ses vulnérabilités. Ses facteurs sont : les caractéristiques des matériaux, la typologie structurelle et les aléas externes. C'est pourquoi, cette étude structurelle se compose de plusieurs parties, à savoir :

- *L'étude des matériaux de construction*

Plusieurs méthodes de caractérisation des matériaux de construction sont essentielles pour comprendre leurs différentes caractéristiques. Ces dernières jouent un rôle dans la définition du comportement de ces matériaux. Les méthodes de l'étude des matériaux de construction sont :

- *L'étude physico-chimique des matériaux :*

L'analyse physico-chimique est basée sur les matériaux d'échantillonnage des constructions pour définir la composition minéralogique, déterminer la taille des particules, les paramètres physiques et mécaniques, ainsi que l'origine des matériaux caractérisant le processus de dégradation (lié à leur comportement). La caractérisation physico-chimique des matériaux de construction est indispensable dans l'étude structurelle. Car, les caractéristiques physico-chimiques influencent sur le comportement mécanique des matériaux, et donc sur le comportement structurel de la coupole.

Introduction

La détermination de certains paramètres physiques a deux objectifs. Certains paramètres seront exploités, d'abord, pour déterminer les paramètres mécaniques des matériaux, mais également dans la simulation numérique du comportement structurel. Dès lors, il est important de déterminer les caractéristiques physiques des matériaux suivantes :

La densité apparente est évaluée en mesurant le poids sec à 60 ° C, divisé par la valeur du volume apparent.

La masse volumique apparente est déterminée en plongeant l'échantillon dans du mercure et en mesurant la variation du niveau qui correspond au volume apparent. Pour effectuer cette mesure, un pycnomètre Hg de Chandler Engineering est utilisé.

L'étude chimique se compose en deux analyses complémentaires, à savoir :

- L'analyse pétrographique par observations sur coupes minces au microscope optique en lumière polarisée transmise (microscope Zeiss AXIO Scope.A1) est accomplie , en appliquant la procédure suivante: les échantillons sont incorporés dans de la résine, puis ils sont lissés selon la coupe que nous voulions observer, ensuite ils sont collés sur une lame de verre; à ce stade, sur le côté opposé de la lame, l'échantillon est abrasé jusqu'à une épaisseur d'environ 100 um et ensuite lissé avec un émeri de 1200 grains jusqu'à une épaisseur de 30 um.

- L'analyse minéralogique : l'étude de la composition minéralogique principale est déterminée par la diffraction des rayons X sur poudre (XRD). Cette méthode d'analyse permet la reconnaissance des phases à structure cristalline dans un matériau. Les données semi-quantitatives sont obtenues en comparant l'allongement des pics avec celui des échantillons standards. La connaissance de la composition minéralogique est importante pour le diagnostic car, elle influence le comportement mécanique du matériau.

- *Etude mécanique :*

Cette étude permet de déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux, à l'échelle de chaque matériau de construction et à l'échelle de la maçonnerie historique, et cela par le biais des essais mécaniques destructifs au laboratoire ou non destructifs *in situ*. Ces essais mécaniques ont pour objectif de déterminer : La résistance à la compression ; La résistance à la traction ; Le module d'élasticité ; La ductilité

cinématique ; Ductilité cinématique disponible ; et la résistance à la flexion. Ces caractéristiques mécaniques sont déterminées par les essais suivants : essai de compression uniaxiale ; essai de traction indirecte (brésilien) ; essai de flexion trois points ; ainsi que d'autres essais non destructifs *in situ* par pénétromètre réalisés sur le mortier. La superposition des résultats physico-chimiques et mécaniques, permet de comprendre le comportement structurel de la maçonnerie historique en *Rose des Sables*. À la fin, les paramètres mécaniques seront requis pour la simulation numérique de comportement structurel.

- *L'analyse structurelle :*

Cette analyse a pour objectif de définir le comportement structurel de la coupole et de la construction à coupole. Plusieurs méthodes servent à l'analyse de comportement structurel des coupoles en *Rose des Sables*, à savoir :

Une analyse préliminaire du comportement structurel d'une coupole représentative est effectuée en utilisant l'approche statique de l'analyse limite, cela à travers l'analyse d'une simple tranche de la coupole avec méthodologie du facteur de sécurité complet « *full range factor of safety* » proposée dans (Galassi & Tempesta, 2019; Tempesta & Galassi, 2019).

En outre, les simulations de comportement structurel de la coupole autonome représentative d'une part, et la construction à coupole d'autre part, sont réalisées par des analyses élastiques linéaires et non linéaires de la méthode des éléments finis *FEM*. L'analyse *FEM* permet de calculer numériquement le comportement structurel de la construction. La simulation *FEM* est réalisée grâce au logiciel de code commercial *DIANA FEA* (DIANA FEA, 2009). Cela est dû à la capacité du logiciel à simuler le comportement structurel de différents éléments finis à l'image de la coque et les solides, avec analyse linéaires et non linéaire (DIANA FEA, 2009). Aussi, vu que l'analyse des structures historiques représentées par des constructions en maçonnerie délicate, elle nécessite des outils différents et plus distingués que dans le cas des structures modernes. Le logiciel *DIANA FEA* dispose d'une suite de capacités d'analyse uniques qui donnent à l'utilisateur la possibilité d'analyser les structures de maçonnerie en détail, ou dans leur ensemble, sous des charges standards ou extrêmes (DIANA FEA, 2009). Dans chaque étape, il est nécessaire d'étudier les contraintes et les déformations. Il est aussi important d'analyser d'une part des informations quantitatives (les valeurs des efforts

Introduction

et des déplacements), d'autre part, les informations qualitatives (la répartition des contraintes et la localisation des zones de traction ou de compression). De surcroît, la comparaison des résultats de ces deux étapes permet de connaître le degré d'adaptabilité des matériaux de construction avec la forme de la coupole. Ainsi, Les résultats permettent une interprétation des modèles de désordres observés lors du diagnostic structurel.

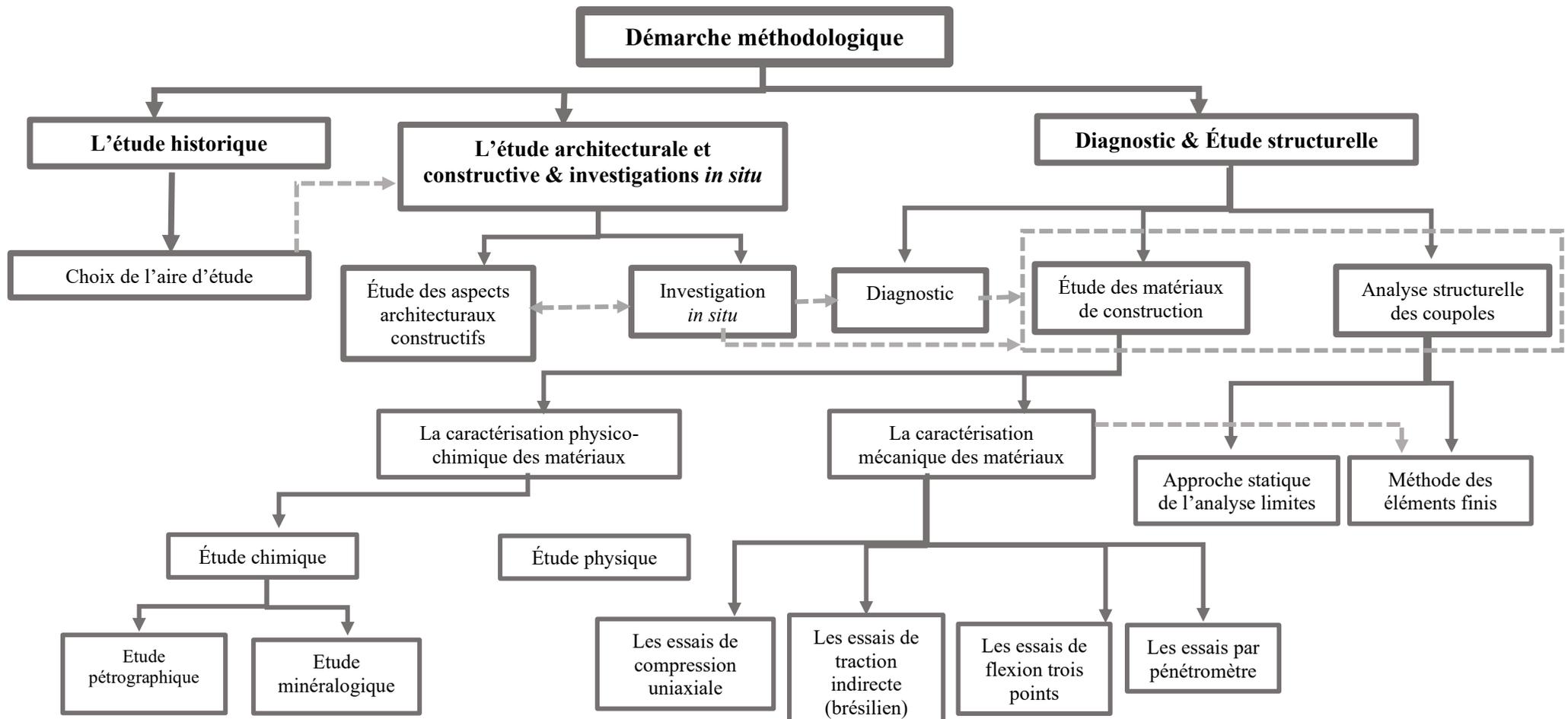


Figure 1. Schéma de dispositif méthodologique de la présente recherche, (l'auteure).

b) Positionnement épistémologique

Étant mentionné que l'essence de cette recherche s'inscrit plutôt dans les recherches expérimentales que dans les recherches en sciences humaines. En effet, elle se positionne épistémologiquement dans l'approche du positivisme. Elle a la nature de la recherche appliquée. De ce fait, cette thèse appartient au champ des recherches semi-empiriques. Par conséquent, il est évident que la méthode soit une méthode de prospection inductive.

D'abord, la recherche est empirique à cause de son caractère exploratoire. Cela, à travers la démarche du diagnostic, qui exploite les résultats des essais de matériaux, ainsi de la simulation numérique de comportement structurel des coupoles, pour formuler une proposition d'une démarche de diagnostic spécifique à notre cas d'étude. Elle est inductive, par le fait de prospecter puis d'induire une démarche méthodologique de diagnostic des coupoles en *Rose des Sables*. Cela se fait par le biais des expérimentations effectuées sur le cas d'étude.

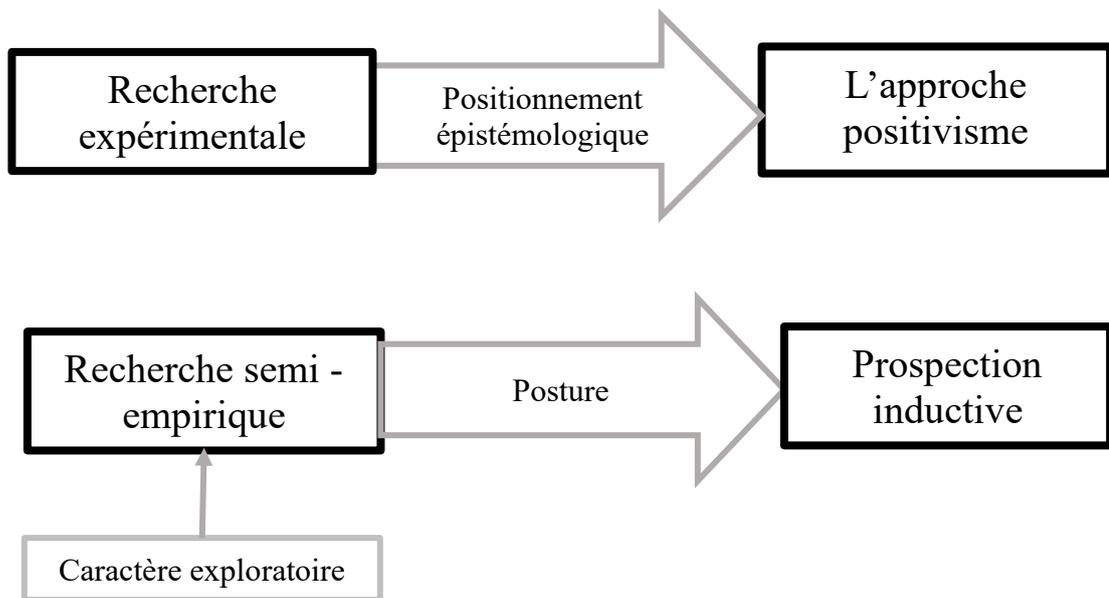


Figure 2. Positionnement épistémologique de la recherche, (l'auteure).

Ainsi, La présente recherche vise à faire :

- le descriptive des typologies des coupoles existantes. Elle décrit aussi le phénomène de dégradation de ces coupoles.
- la compréhension des phénomènes de dégradation et la détermination des paramètres de dégradation à travers les essais et leur analyse.

-l'explication des paramètres de dégradation, et les mettre en relations avec les pathologies observées sur le terrain. Dans cette optique, en se basant sur une recherche de type quantitative, qui sert à déterminer ces relations, mais, en les associant à la recherche de type qualitative utilisée dans l'observation des pathologies sur le terrain.

- la classification, d'abord à travers la classification des typologies des coupoles existantes, ainsi que, la classification de pathologies observées.

6. Intérêt, impact, originalité et limites de la recherche

Ce genre d'études présente des avantages et des intérêts, mais aussi des limites. L'intérêt principal que suscite notre sujet de recherche vient de son positionnement au croisement de deux champs de prospections, l'un à caractère académique et l'autre à caractère professionnel.

Au premier lieu, l'importance de ce sujet demeure dans le travail sur les cultures constructives patrimoniales relatives dans une zone désertique donnée, et les études sur les matériaux locaux dans les milieux académiques, allant de l'architecture, aux sciences de l'ingénierie, voir aussi les sciences de l'histoire. L'aspect architectural et technique est la base de la présente recherche. Bien que ce type de travail soit de nature technique, son intérêt est aussi de faire prendre conscience de la valeur patrimoniale de l'architecture vernaculaire (dispositifs et matériaux locaux). Cela se fait dans un effort dirigé vers le développement durable de ces régions à travers leur conservation. L'intérêt demeure ainsi dans les avantages scientifiques de cette étude, notamment dans l'utilisation d'une approche intégrant plusieurs techniques complémentaires. Enfin, les résultats de notre recherche pourront être généralisés sur d'autres cas.

L'intérêt de ce thème dans le domaine professionnel est d'utiliser la méthodologie du diagnostic et le modèle numérique comme outil d'aide à l'évaluation de désordre et à la prise de décision pour les opérations de conservation. Ces outils permettent la réinsertion des techniques constructives de typologies des coupoles du *Souf* dans une nouvelle perspective d'intervention et de conservation. Par conséquent, le travail sert à sauvegarder un patrimoine matériel, à savoir les coupoles en *Rose des Sables* et l'unicité de son paysage urbain. Il sert aussi à sauvegarder le patrimoine immatériel, qu'est le savoir-faire et les procédés de construction des coupoles.

De plus de ce qui est évoqué en amont, l'originalité de ce travail, réside dans le fait qu'il offre un champ de recherche exploratoire, non démythifié. De ce fait, ce travail est une tentative de fusionnement des outils d'exploration pour formuler une démarche méthodologique propre au cas d'étude. D'ailleurs, ce dernier semble être un cas inédit dans le patrimoine architectural vernaculaire.

a) *Impact*

L'audience de ce travail est diversifiée. Les différents acteurs, issus de plusieurs disciplines, peuvent en tirer profit, et lancer à travers cette recherche d'autres travaux autour du même thème. Ces travaux visent à combler les lacunes et à apporter des réponses aux pistes de la recherche.

Dans le milieu académique, ce travail propose d'approfondir débat autour de l'utilisation des nouvelles méthodologies de diagnostic dans le patrimoine architectural vernaculaire. En outre, ce débat portera également sur la connaissance sur ce type de patrimoine bâti unique à cette région et les défis de sa conservation.

Dans le milieu professionnel, cette approche servira de modèle pour les procédés de diagnostic et d'intervention sur ce type particulier de patrimoine vernaculaire. Elle pourrait également servir une base à l'élaboration d'autres recommandations, qui guideraient les différentes étapes d'intervention et de conservation de ces coupoles. De même, elle permet d'améliorer les procédés techniques de constructions de ces coupoles. En résumé, la présente recherche porte sur un volet scientifique d'une part, et un volet opérationnel d'autre part.

b) *Limite et contrainte*

Comme toute recherche, notre travail a des complexités et des limites. Plusieurs contraintes ont été rencontrées. La documentation sur l'architecture vernaculaire de la région n'est pas nombreuse surtout celle qui traitent les techniques de construction utilisées, plus précisément, l'absence des connaissances sur le matériau de construction la *Rose des Sables*. En conséquence, ce dernier est soumis à des tests pour comprendre son comportement. Cependant, le transport des matériaux de la région du *Souf* au département d'architecture de l'Université de Florence présentait des difficultés d'ordre administratif liées à l'autorisation de déplacer des échantillons à l'extérieur du pays, mais également financier vu le coût exorbitant du transport en raison de la quantité des

échantillons nécessaire pour les études en laboratoire. Bien qu'une quantité importante de matériau ait été transportée afin de permettre nombre de tests considérable et de garantir la crédibilité des résultats, le facteur d'hétérogénéité et de porosité élevée de la pierre de la *Rose des Sables* a créé des difficultés dans l'interprétation des résultats. Par ailleurs, la porosité en elle-même représente une contrainte, nécessitant un traitement délicat des échantillons lors de leur découpage en spécimens pour les tests. Malgré le nombre des tests effectués, nous avons mis en évidence des stratégies d'adaptation lors l'interprétation des résultats.

La nature de la présente recherche nécessite un travail de terrain et des investigations *in situ*. La demande d'accès aux maisons des habitants a pris beaucoup de temps. Le manque des terrasses plates et accessibles dans la région a rendu les relevés par scanner laser 3D difficile, en découle parfois des relevés avec quelques vides. En outre, l'opération de traitement et de nettoyage de nuage des points relevé par le scanner laser 3D était compliquée vu l'existence de nombreux meubles à l'intérieur des pièces. Bien que le relevé par Scanner laser 3D donne des résultats détaillés et précis sur la construction, le processus de réalisation de modèle pour l'analyse structurelle est complexe car il nécessite une coordination et un échange entre différents logiciels, un ordinateur doté de processeurs puissants et un temps considérable pour le traitement des données. Avec ce long processus, il était nécessaire de sélectionner une partie représentative de la maison, qui répond à l'objectif de la recherche à savoir deux cellules à coupoles.

La recherche se limite à l'analyse des matériaux de constructions et de la structure pour comprendre les désordres et les divers scénarios des dommages, dans le but de définir un outil adéquat pour les interventions futures visant la sauvegarde de ce patrimoine. Dans la présente recherche, et vue sa contrainte temporelle, la sélection de cas d'étude est faite sur une seule typologie des coupoles en *Rose des Sables*, étant donné que c'est la typologie la plus répandue dans la région et le plus vulnérable. Ce choix d'une typologie unique mais représentative qui permet d'avoir une vision globale sur les autres variantes structurelles et constructives qui pourraient à leur tour faire objet d'études approfondies ultérieurement.

7. Structuration de la thèse

L'approche adoptée pour répondre aux objectifs de ce travail, nous a amenée à organiser la présente thèse en deux parties, dont chacune contient deux chapitres (Figure 3) :

La première partie : elle contribue à « la connaissance et la reconnaissance de la région du *Souf* et de son patrimoine » dans les deux chapitres : la première traite du contexte historique, urbanistique et patrimoniale de la région, tandis que le deuxième traite la culture architecturale et constructive du *Souf*. Les connaissances élaborées dans cette partie ont été exploitées dans la partie suivante.

La deuxième partie : elle traite du « processus méthodologique de diagnostic », ceci dans les deux chapitres : le premier diagnostic et évaluation préliminaire des pathologies courantes observées lors de l'investigation *in situ*, en proposant des hypothèses sur les causes de ces phénomènes de dégradations, à y répondre dans le dernier chapitre. Ce dernier traite de l'évaluation de la vulnérabilité des constructions à coupole par : d'abord, l'analyse du comportement des matériaux de construction à travers une série des expériences ; puis, l'analyse du comportement structurel de la coupole et la construction à coupole en *Rose des Sables*.

Après interprétation des résultats obtenus, la présente thèse s'est clôturée par une conclusion générale. Cette dernière résume le processus d'élaboration de cette recherche et met en évidence l'apport et l'intérêt des résultats obtenus en réponse aux problèmes et objectifs de notre recherche, et en lançant ses perspectives. Pour faciliter la lecture du manuscrit, la référence aux sources utilisées, est mentionnée dans l'ensemble des chapitres et une bibliographie générale a été préparée, à la fin de ce travail.

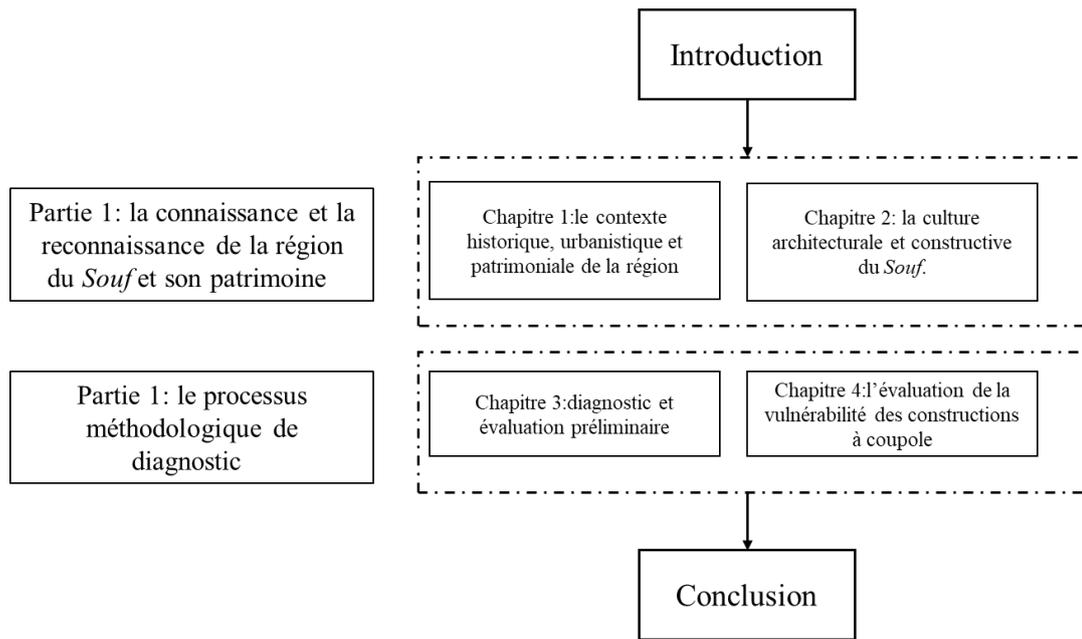


Figure 3. Structure de la thèse, (l'auteure).

8. Revue de la littérature

Notre recherche sur « *l'élaboration d'une démarche méthodologique de diagnostic sur les coupoles du Souf en Algérie* » s'inscrit dans un cadre conceptuel global. Ce cadre conceptuel se structure en plusieurs concepts et aspects à savoir : connaissance et étude cognitive de la région du *Souf* d'une part, et méthodologie et aspects techniques d'autre part. Notre revue de la littérature se base sur cette structure conceptuelle ci- dessous (Figure 4).

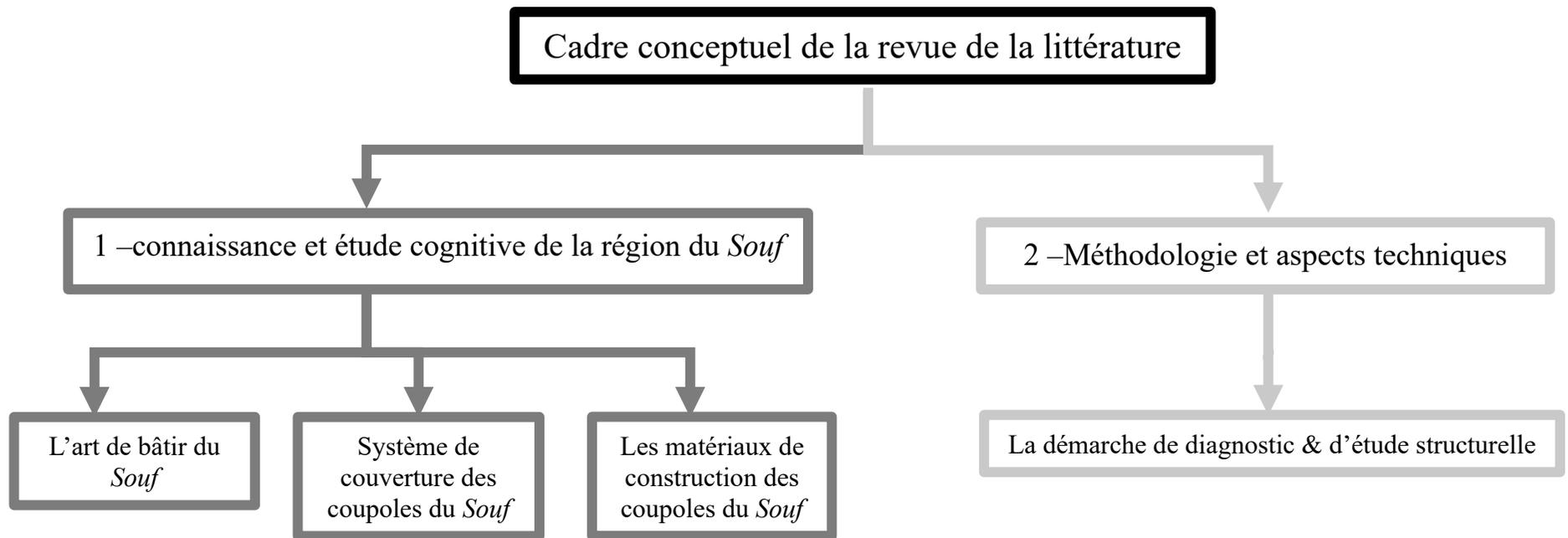


Figure 4. Organisation du cadre conceptuel de la revue de la littérature (l'auteure).

a) *Connaissance et étude cognitive*

1. *L'art de bâtir du Souf*

L'art de bâtir du *Souf*, par sa particularité dans l'utilisation des coupoles, a été traité par plusieurs chercheurs dans différentes disciplines avec des aspects divers. Le géographe *Jaun-claude Echallier*, dans sa recherche « *Essai sur l'habitat sédentaire traditionnel au Sahara Algérie* » a traité le caractère urbain des tissus urbains de *Sahara* algérien (Echallier, 1968). En effet, il a abordé le sujet sur l'agglomération du *Souf* d'un point de vue organisationnel et de croissance urbaine. Dans le même sens, *Claude Bataillon*, à travers sa recherche intitulée « *Le Souf : étude de géographie humaine* », a décrit les plans des plus anciennes villes du *Souf*, à l'exemple de *Guémar* et *Kouinine* (Bataillon, 1955). Ces dernières ont une croissance concentrique avec des voiries orthogonales (Bataillon, 1955; Echallier, 1968). Après, *David Mangin* et *Philippe Panerai*, avec leur article « *institutions et formes urbaines. Guémar et Tamelhat* », ont venu confirmer ces caractéristiques urbaines (Mangin & Panerai, 1978). Mais encore, ils ont décrit les conditions d'implantation du centre de *Guémar*, son paysage urbain et la constitution de la forme urbaine de ce centre.

D'autre part, l'architecture résidentielle du *Souf* a également été abordée par ces mêmes auteurs afin de déterminer sa typologie traditionnelle. *Jaun-claude Echallier* décrit la composition des habitations rurales du *Souf* qui forment un ensemble homogène. En passant à l'échelle de la maison, sa composition et son organisation, ainsi que la description de l'architecture de la maison *Soufi* étaient similaires dans les trois références (Bataillon, 1955; Echallier, 1968; Mangin & Panerai, 1978). En effet, l'organisation de la maison *Soufi* suit la tradition algérienne locale. Cette maison est une construction avec une cour centrale, entourée de pièces adjacentes. La spécificité des maisons *Soufi* se manifeste par la présence d'un portique situé sur la face sud de la cour. De plus, selon (Coté, 2006; Najah, 1971), l'unité de grandeur des pièces s'unit à l'unité de toiture qui est la coupole mesurant environ 2.50 mètres.

Des études d'évaluation du confort thermique, ont été menées sur ces constructions à coupoles. À l'exemple de l'acte de conférence « *évaluation des performances énergétiques de l'habitat traditionnel dans la région du Souf* », qui traite et analyse des solutions conceptuelles et techniques telles que l'utilisation des coupoles, avec une simulation numérique sur la performance énergétique de cette habitation (Fezzai et al.,

2012). Comme toute construction traditionnelle, Cette dernière a démontré son intégration en termes d'efficacité énergétique, résultant des formes compactes relatives à ce type de construction.

La filiation de la technique de la coupole de maison demeure encore moins connue à ce jour. Selon (Bataillon, 1955; Echallier, 1968), la filiation de cette technique est orientale. Marc Coté ajoute « on peut trouver certaines analogies avec l'habitat à coupole de certaines régions de Nubie, Syrie et Iran », (Coté, 2006). Au terme de la recherche magistrale intitulée « les cultures constructives traditionnelles. Cas des Aurès, L'Oued Mya et Le Souf », l'auteur a confirmé la filiation orientale des peuples du *Souf*, venus de Syrie, où ils ont transféré cette technique à la région du *Souf* (Lebsir, 2016).

À travers cette dernière étude (Lebsir, 2016), l'auteur a cherché à reconnaître la culture constructive des régions subsahariennes, comme la région du *Souf*. Il a traité la culture constructive du *Souf* à travers ces différents aspects, mettant l'accent sur son savoir-faire vernaculaire. Cela s'est fait à travers l'analyse de la technique constructive, traitant aussi les procédures de production des matériaux de construction. Enfin, l'auteur a expliqué le processus de réalisation de constructions d'époques différentes à travers ses différents composantes structurelles (fondations, murs, coupole...etc.). Dès lors, il n'a abordé que certains aspects de la production des matériaux de construction de la coupole en *Rose des Sables*, ainsi que d'une brève description de sa construction. À ce propos, ce système structurel, la coupole, et ses matériaux de construction présentent une originalité pour cette région, mais à ce jour ils ne sont pas bien saisissables.

En bref, ce résumé de plusieurs travaux sur les constructions de la région du *Souf*, présente beaucoup plus des recherches à caractère urbanistique–architectural, historique et géographique, ainsi que sur la performance énergétique. En effet, les aspects techniques et constructifs, notamment ceux des coupoles, restent moins étudiés, malgré leur importance dans la construction vernaculaire du *Souf*.

2. *Système de couverture « les coupoles du Souf »*

Les connaissances de la technique constructive de la coupole et ses procédés de construction dans la région du *Souf* a été discutée par plusieurs auteurs. Dans(Coté, 2006), Marc Coté a donné une description sur la construction de la coupole en *Rose des*

Sables. Cette dernière est montée sans coffrage. En décrivant sa réalisation et sa construction, on a remarqué que son diamètre ne dépasse pas 2.50m. En travaillant avec la corde, on a remarqué que sa longueur est égale au rayon de la coupole à construire. Elle est immobilisée d'un côté à un piquet installé au centre, de l'autre à son poignet. En utilisant la pierre de la *Rose des Sables* et du gypse, le maçon monte les assises successives, les unes sur les autres, jusqu'à ce qu'il termine au milieu. La possibilité de la réalisation de ces coupoles sans coffrage est due à la capacité du liant, le gypse, de prise très rapide.

Dans son livre (Coté, 2006), *Marc Coté* a parlé de la coupole en *Rose des Sables* et sa technique de construction de manière générale. Tandis que les deux géographes, *Jaun-claude Echallier* dans (Echallier, 1968) et *Claude Bataillon* dans (Bataillon, 1955), précisent l'existence d'une technique ancienne de construction de la coupole en *Rose des Sables*. Selon (Echallier, 1968), l'exécution de cette coupole se fait sur une base composée de murs ou des arcs aplanis au même niveau. Ensuite, viennent des petites trompes en gypse qui se greffent. Par la suite, le travail de construction se réalise d'une manière progressive, assise par assise, avec le matériau la *Rose des Sables* et le mortier à base de gypse. L'auteur précise également que cette coupole est très aplatie, et sa forme est proche d'une voûte en arc de cloître¹, mais la différence réside dans ses arêtes qui seraient courbées. Les coupoles peuvent être recouvertes d'un enduit. Celles qui ne sont pas revêtues témoignent du statut économique de leurs propriétaires.

Cependant, l'auteur a cité aussi l'existence d'une autre technique récente de construction de la coupole en *Rose des Sables*. Dans ce cas, le plan de la coupole est un carré régulier. Ses angles étaient également raccordés par des trompes de gypse. Pour sa réalisation, on plante un piquet, au centre du carré, dans le sol. On rappelle que le piquet a le même niveau que les murs périphériques. Pour son tracé d'implantation, on fixe une ficelle, d'une longueur égale au rayon du cercle de base après on monte jusqu'à la poignée de cette coupole. Sa forme est plus ou moins demi sphérique. Selon l'auteur, l'âge de cette procédure de construction est inconnu. Il est clair que la technique de construction décrite par *Marc Cote* est la technique de construction récente décrite par les deux géographes.

¹ Voûte e arc de cloître : est obtenue par l'intersection de deux berceaux qui se croisent à angle droit e conservant les parties intérieures aux arêtes d'intersections (Vandal, 2020)

D'autre part, *David Mangin et Philippe Penerai*, dans leur article « *institutions et formes urbaines. Guémar et Tamelhat* », ont repris les informations citées par les deux géographes, à savoir l'existence de deux techniques de construction de la coupole en *Rose des Sables* au *Souf* (Mangin & Panerai, 1978). Les auteurs de cet article ont ajouté que l'ancienne technique de construction de coupoles aplaties a été abandonnée dans les années cinquante. Ainsi qu'elle a été remplacée par la coupole demi-sphérique montée sans cintre et par assises successives.

A cet égard, il est résumé qu'il existe une évolution dans la technique de construction des coupoles en *Rose des Sables*. Cela permet de créer une variété de typologies des coupoles dans l'habitat de la région, en tenant également compte des typologies existantes dans les édifices culturels. La question des typologies des coupoles en *Rose des Sables* au *Souf* reste également moins connue dans les recherches scientifiques, particulièrement rare dans les plus récentes. Cette variété typologique de coupoles permet de poser la question sur la différence entre ces typologies en termes de forme architecturale et de comportement structurel. La réponse à ces questions peut éclairer cette évolution du savoir-faire de la construction de coupoles et l'adaptabilité des matériaux de construction avec la forme adoptée.

3. Les matériaux de construction de la coupole du Souf

Le sol et le sous-sol du *Souf* présentent une richesse de variété de matériaux locaux. Ces derniers ont été considérés comme un facteur de contexte qui a permis l'émergence d'une typologie architecturale particulière à cette région, qu'est la construction à coupole. Les matériaux locaux utilisés dans la construction de ces coupoles sont la *Rose des Sables* et le gypse. Certains auteurs ont abordé ces matériaux dans leurs travaux de recherche.

Les deux géographes précédents, (Bataillon, 1955; Echallier, 1968), ont cité ces matériaux locaux dans leurs recherches. D'abord, Ils ont décrit les concrétisations gypseuses qui existent. Ces formations cristallisées sont constituées de gypse qui « *donne la forme et le ciment qui englobe les grains de sable en une sorte de réseau* » (Bataillon, 1955). Ces concrétisations donnent différentes roches, qui varient en dimensions et en forme à savoir : la *Rose des Sables* connue localement sous le nom de *Louz*, et la pierre de *Tafza*. Selon (Bataillon, 1955) la *Rose des Sables* est construite de cristaux en fer de lance imbriqués de différentes dimensions. D'autre part, *Echallier* a

mentionné que la *Rose des Sables* est une pierre hétérogène, et qu'elle est composée de gypse siliceux cristallisé, et les pierres blanches sont souvent les plus fragmentées (Echallier, 1968). Ce matériau local est considéré comme un excellent matériau de construction en raison de sa résistance mécanique et sa rugosité élevée. Cette supposition sur la résistance de ce matériau et sa composition minéralogique n'est pas confirmée expérimentalement. D'autant plus les auteurs ont mentionné que ces informations se basent uniquement sur l'observation visuelle, c'est-à-dire elles présentent des incertitudes. D'autre part, ils ont traité la pierre de *Tafza*, qui forme la matière première du gypse, et son continu qui se constitue de peu de sable. Il existe aussi d'autres matériaux dans ce sol mais qu'on ne va pas les traiter parce qu'ils ne sont pas exploités dans la construction de ces coupes.

Après cette description sur la revue de la littérature qui traite des hypothèses sur la composition et la formation de ces matériaux locaux, il est important de traiter la préparation de ces matériaux qui a été abordée par (Echallier, 1968; Lebsir, 2016). La pierre de la *Rose des Sables* apparente et affleurant le sol est ramassée à la main. Mais un travail d'extraction est nécessaire si la pierre est en profondeur. Par conséquent plusieurs outils sont utilisés pour ce travail, comme le procédé à la dynamite, en raison de la dureté de ce matériau souvent utilisé. La pierre de *Tafza*, quant à elle, est utilisée pour produire du gypse local. Cependant il faut se débarrasser de toutes les couches supérieures pouvant être constituées de *Rose des Sables* ou de sable pour arriver à la masse compacte de *Tafza* dans le sol. L'auteur a brièvement décrit la procédure de transformation de la pierre de *Tafza* en poudre de gypse.

Il est clair, après ce résumé sur les matériaux de construction, qu'ils présentent moins d'informations sur leurs compositions minéralogiques, notamment leurs caractéristiques physico-chimiques. Ces caractéristiques jouent un rôle important dans la détermination de certaines sources de pathologies dans ces constructions à coupes, ainsi pour la définition du degré de comptabilité entre ces deux matériaux. D'autre part, la question se pose également de la résistance mécanique de ces matériaux, qui est nécessaire pour déterminer leur adaptabilité à la forme de cette coupe complexe, tout en confirmant ou affirmant les hypothèses des auteurs sur son comportement.

b) Méthodologie et aspects techniques

Toute approche visant à conserver le patrimoine architectural doit être précédée d'une démarche méthodologique du diagnostic. Une compréhension approfondie de la construction et sa vulnérabilité est la base nécessaire pour planifier une conservation compatible et durable du patrimoine architectural en maçonnerie historique. Par conséquent, il est important d'analyser des exemples d'études, qui visent à réaliser le diagnostic sur des constructions historiques en maçonnerie et couvertes par des planchers arrondis, à savoir des coupoles et des voûtes.

Dans le contexte géographique algérien, une étude sur les coupoles a été réalisée par (Driouèche, 2012), intitulée « *Les coupoles d'al-Djaza'ir de l'époque ottomane (XVIe-XIXe siècles)* ». La recherche porte sur les coupoles octogonales d'al-Djaza'ir, de l'époque ottomane à Alger. Elle est introduite dans le thème de sauvegarde du patrimoine bâti traditionnel algérois. Outre l'étude des coupoles à l'échelle urbaine, une analyse architecturale et constructive a été faite sur l'origine de la forme de la coupole, sa géométrie et sa structure. Cette analyse vise à restituer les techniques constructives traditionnelles spécifiques au contexte algérois d'une part, et d'apprécier la logique constructive traditionnelle d'autre part. Elle a également permis d'identifier le rôle de certains éléments constructifs participant au renforcement de la coupole à travers la modélisation par la méthode des éléments finis.

Le livre « *Earthen domes et habitats. Villages of northern Syria. An Architectural tradition shared by east and West* » est le résultat d'un projet de la Commission européenne 2020, mené par des équipes scientifiques multidisciplinaires de 2007 à 2009. Il s'agit d'une publication de recherches richement documentées et abondamment illustrées (Mecca et al., 2009). L'ouvrage est une référence en la matière, tant le travail présenté est minutieux et exhaustif. En particulier, une démarche multidisciplinaire a été suivie pour documenter et diagnostiquer un type de patrimoine vernaculaire en terre, qui sont les agglomérations à constructions à coupole du nord de la Syrie. Plus à la contribution aux connaissances qu'apporte cette recherche, son importance s'est également constituée dans la méthode de diagnostic suivie. Cette méthode a permis de comprendre le fonctionnement de la maçonnerie et ses matériaux à travers différents tests (mécanique, physique, minéralogique et pétrographique). De même, elle a servi à comprendre le comportement de la construction à travers la modélisation et la

simulation structurel par la méthode des éléments finis FEM. Elle a également permis de définir les causes des désordres observés de ce type d'architecture, qui semble avoir des points communs avec l'architecture vernaculaire du *Souf*. Etant donné que la nature des matériaux étudiés dans la recherche citée (la terre) et celle de la présente recherche (la *Rose des Sables*) est différente, il est important de voir aussi d'autres recherches qui traitent de la maçonnerie historique similaire à notre cas d'étude.

En effet, plusieurs recherches se sont concentrées sur l'évaluation des caractéristiques de la maçonnerie historique en pierre. Selon (Borri et al., 2015), une méthode, appelée indice de qualité de la maçonnerie, pour analyser et classer la maçonnerie historique a été mise en place. Elle est basée sur l'attribution d'un ensemble de paramètres identifiant la règle de l'art de la maçonnerie. Les paramètres pris en compte par cette méthode sont : 1. Propriétés mécaniques de la pierre et état de conservation ; 2. Propriétés dimensionnelles de la pierre ; 3. Forme de pierre ; 4. Niveau de connexion entre les lignes des blocks adjacents composant le mur ; 5. Caractéristiques des joints au niveau horizontal ; 6. Caractéristiques des joints verticaux ; 7. Propriétés mécaniques du mortier. Le respect des paramètres de la « *règle de l'art* » est évalué à travers trois jugements : conforme, partiellement conforme et non conforme. Certes la méthode de l'indice de qualité de la maçonnerie fournit une explication du comportement de la maçonnerie historique, mais elle reste une méthode qualitative. Dès lors, d'autres références basées sur des approches quantitatives ont été prises en considération pour notre recherche.

De ce fait, des méthodes quantitatives devront être exploitées pour l'analyse de la maçonnerie en *Rose des Sables*, traitées dans plusieurs travaux (Abderrahim Mahindad, 2017; Alecci et al., 2016; Briccoli Bati et al., 2001; Drougkas et al., 2016; Grande & Romano, 2013; Marcari et al., 2007; Matysek & Witkowski, 2016; Parent, 2015; L. Rovero & Fratini, 2013; Luisa Rovero et al., 2009; Shu et al., 2017). Ces références concernent la compréhension du comportement des matériaux à partir de la composition minéralogique. Cette dernière est déterminée par la diffraction des rayons X sur poudre (XRD), ainsi que par analyse pétrographique par l'observation sur coupes minces au microscope optique en lumière polarisée transmise (Almeida et al., 2012; V la Spina, 2018; V, la Spina et al., 2014; Lourenço et al., 2010; Zouaouid & Gheriani, 2019). Les méthodes d'analyse de la maçonnerie citées sont également adaptées à la nature de la maçonnerie historique en *Rose des Sables*, caractérisée par des irrégularités et une

porosité qui compliquent l'interprétation des résultats des essais mécaniques. Donc, les méthodes ont abordé le problème de l'évaluation des propriétés mécaniques actuelles et de la fiabilité statique résiduelle des éléments porteurs en pierre. Elles ont aussi traité les murs en maçonnerie avec une texture irrégulière, grâce à des recherches expérimentales et à l'analyse numérique de maçonnerie poreuse à l'exemple du *Tuf*. À cet égard, et malgré les certaines similitudes entre les maçonneries historiques traitées dans les références citées et la maçonnerie en *Rose des Sables*, il est clair qu'une stratégie originale d'interprétation des résultats des différentes expérimentations doit être mise en évidence. Cette stratégie consistera à s'adapter aux caractéristiques spécifiques de la maçonnerie en *Rose des Sables*.

Le modèle 3D HBIM en diagnostic structurel pourrait être exploité en plusieurs phases. D'abord, selon (Arias et al., 2005; Castellazzi et al., 2017a; F. Laefer et al., 2011; Fregonese et al., 2013; Korumaz et al., 2017; Mukupa et al., 2016; Teza & Pesci, 2013), les modèles 3D HBIM de nuages des points sont des outils pour déterminer les pathologies des constructions *in situ*. C'est grâce au nuage des points, qu'une récupération des données ponctuelles et précises de construction peut être réalisée. Cela est utilisée pour détecter les changements qui sont apparus dans la construction historique, comme la déformation, l'inclinaison, et les fissures, et même pour les quantifier ou les mesurer.

Les modèles 3D HBIM pourraient également être exploités dans la simulation du comportement structurel de la construction historique par la méthode des éléments finis FEM (Castellazzi et al., 2015, 2017a; Dore et al., 2015; Freytag et al., 2011; Hinks et al., 2013; Korumaz et al., 2017; Tucci et al., 2019). Cela a permis d'avoir des résultats plus exacts, d'autant plus que la géométrie de ces modèles est précise. Concernant la simulation numérique par la méthode des éléments finis FEM par approche linéaire ou non-linéaire, plusieurs recherches (Betti et al., 2011; Castellazzi et al., 2017b; Cavalagli & Gusella, 2015; Dore et al., 2015; Freytag et al., 2011; Parent, 2015) ont montré l'importance de cette méthode pour comprendre le comportement structurel des constructions en maçonnerie historique, en particulier celles avec des voûtes et des coupes. Généralement, les résultats des analyses par FEM du comportement structurel des coupes, des voûtes et des arcs pourraient être accompagnés par des résultats de l'analyse limite afin de définir leur ligne de poussée (Galassi & Tempesta, 2019; Heyman, 1969, 1997; Tempesta & Galassi, 2019). À ce propos, l'analyse de

Introduction

comportement structurel de la construction à coupole en *Rose des Sables* pourrait intégrer plusieurs approches.

PARTIE 1

CONNAISSANCE ET RECONNAISSANCE DE LA RÉGION DU *SOUF* ET SON PATRIMOINE CULTUREL

Chapitre 1 : Contexte historique, urbanistique et patrimonial du Souf

1. Contexte géographique de la région du Souf

Le *Bas-Sahara* en Algérie, qui constitue une cuvette concave à l'assise de la chaîne montagneuse « *Zab-Aurès-Nememcha* » et s'étalant jusqu'au Sud tunisien. Celui-ci se compose de gigantesques entités dispersées, dont la région du *Souf* située au Nord-Est, autrement dit au grand erg oriental (Figure 5.a). Cette région, enclavée et sableuse, constitue l'ensemble des oasis existantes entre la région de l'*Oued Righ* et la ligne d'oasis qui s'étend de *Biskra* à *Touggourt* à l'Ouest et du *Chott Melghigh* au Nord à la zone continue des *Sebkhas* à l'Est qui rejoignent le *Chott Djérid* (Figure 5.b). Les oasis du *Souf* sont bordées de tous côtés par la mer de dunes, dépassant 100 mètres de hauteur et 80 mètres comme altitude moyenne, prolongeant au Nord le grand Erg oriental. Géographiquement, Cette région se caractérise par l'absence de reliefs et de chemins accidentés, une caractérisation différente du territoire qui l'entoure (Coté, 2005). Sa surface est d'environ 350.000 hectares (Bel & Cuhe, 1970).

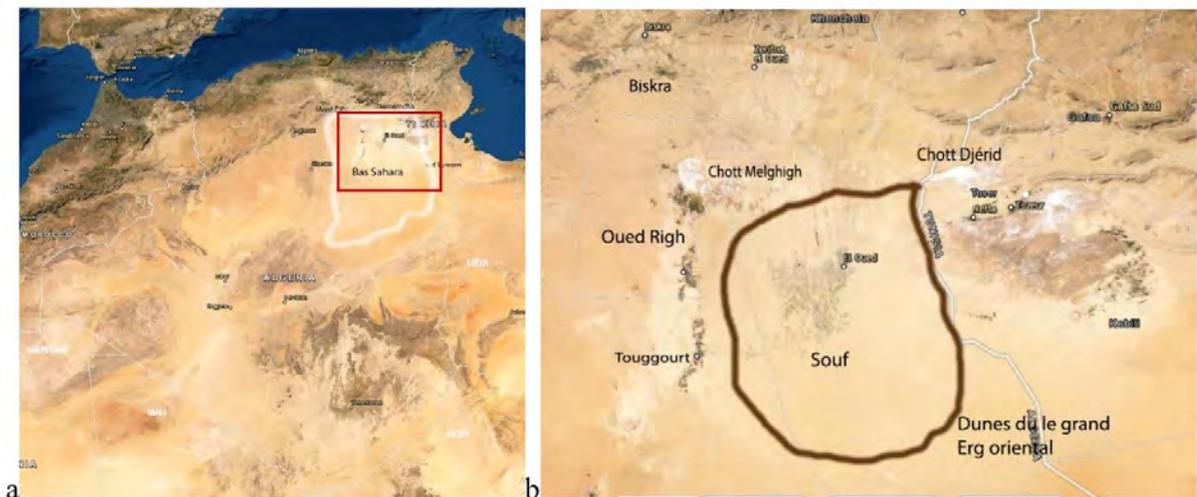


Figure 5. a. Situation géographique du bas-Sahara. b. Extrait de la figure 5.a : situation géographique de la région du Souf. (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020, traitement : l'auteur).

En termes administratifs, la région du *Souf* couvre principalement la *Wilaya* de *Oued Souf*, dont le chef-lieu est la ville d'*El Oued*, créé le 4 février 1984. Ses délimitations administratifs sont : les *Wilayas* de *Tébessa* et *Khenchela* au Nord; la

Wilaya de Biskra au Nord et au Nord-Ouest; la *Wilaya de Ouargla* au Sud et au Sud-Est ; et la *Tunisie* à l'Est (Khechana, 2007; Khechana et al., 2010). Les plus anciennes villes du *Souf* sont *Guemar, Kouinine, Reghiba, Z'goum* etc...

Comme tout le *Bas-Sahara*, le milieu géographique du *Souf* a un climat désertique chaud avec des conditions rudes, recevant 74 mm comme précipitations annuelles moyennes à travers certaines averses rares et irrégulières (Khechana, 2007). En outre, ce climat particulier de la région du *Souf*, qui est caractérisée par des températures élevées et un air fortement sec. Dans une telle nature, la nappe phréatique au *Souf* joue le rôle de source d'eau principale pour le système de culture, elle est alimentée par les précipitations des rares fortes pluies qui tombent sur le Grand Erg oriental (Coté, 2005). Dernièrement, le niveau de la nappe phréatique est remontée en causant des effets négatifs sur le système agricole, et sur le vieux bâti de la région, au cours des siècles précédents (Khezzani & Bouchemal, 2018; Saibi et al., 2009).

2. Région du *Souf*, un patrimoine inscrit dans la Liste indicative de l'Unesco

2002

L'ensemble des oasis du *Souf* présente une diversité de valeurs patrimoniales en termes tangibles et intangibles dans son paysage culturel et naturel original (Figure 6). La particularité réside dans le caractère unique d'un ensemble résultant de l'harmonie du paysage entre le travail de l'homme et la nature désertique, générant ainsi un équilibre entre les besoins humains et la gestion du paysage. Cette symbiose se traduit à travers la volonté humaine de résister aux conditions rudes, en implantant dans un erg imposant un système de culture original dit la technique du *Ghout*, une ingéniosité typique locale reconnue depuis des siècles.



Figure 6.a. Vue des micro oasis _Ghouts_ (<https://amazighouedsouf.home.blog/2018/11/02/>, consulté le 15/08/2020). b. Blocs Gigantesques de la pierre de la Rose des Sables (<http://my3d-city.com>, consulté le 18/08/2020) .

Les *Ghouts* sont des micro-oasis, réalisés par les habitants en créant la zone de culture par le creusement des dunes afin d'atteindre la nappe phréatique (Figure 6.a & 7). Cette disposition permet de planter des palmiers directement au-dessus de la nappe au fond de vastes entonnoirs créés dans le sable. Ces micro-oasis n'ont pas de type qui s'appuie sur une structure géomorphologique ou sur un système hydrographique apparent. Dans l'impossibilité de bloquer l'action continue du vent et des sables, le travail de maintenance de ces *Ghouts* s'avère fortement nécessaire. En effet, la mise en place de barrières artificielles et de palmes autour des *Ghouts* sert à accumuler le sable et maintenir le système protectif des entonnoirs creusés (UNESCO, 2002) . Ainsi, le paysage naturel du *Souf* est décrit par ces *Ghouts* de couleur verte implantés dans ces immenses dunes de sables. En outre, la région du *Souf* est connue par sa richesse naturelle et géologique qui est une source des matériaux locaux dont la pierre de la *Rose des Sables* (Figure 6.b).

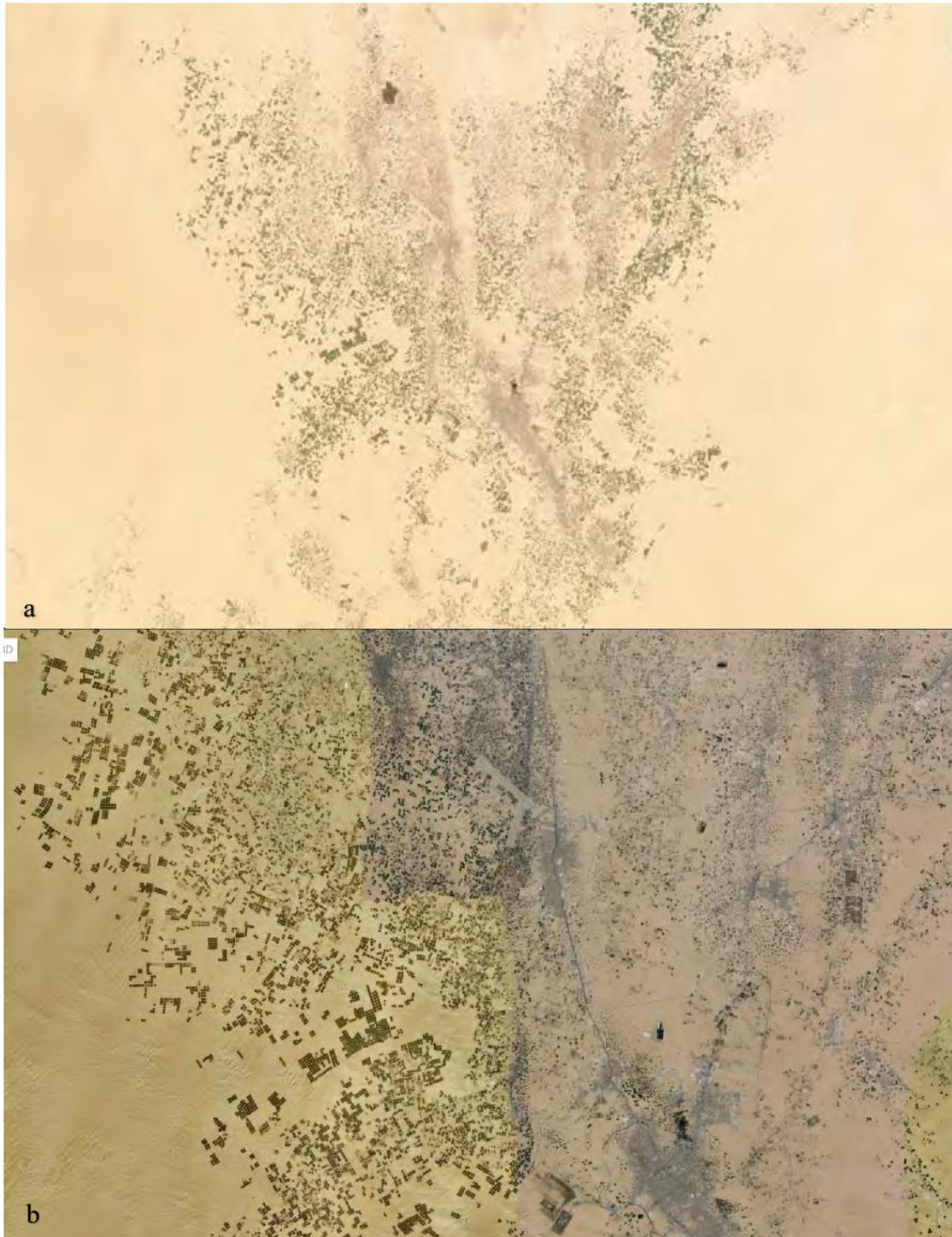
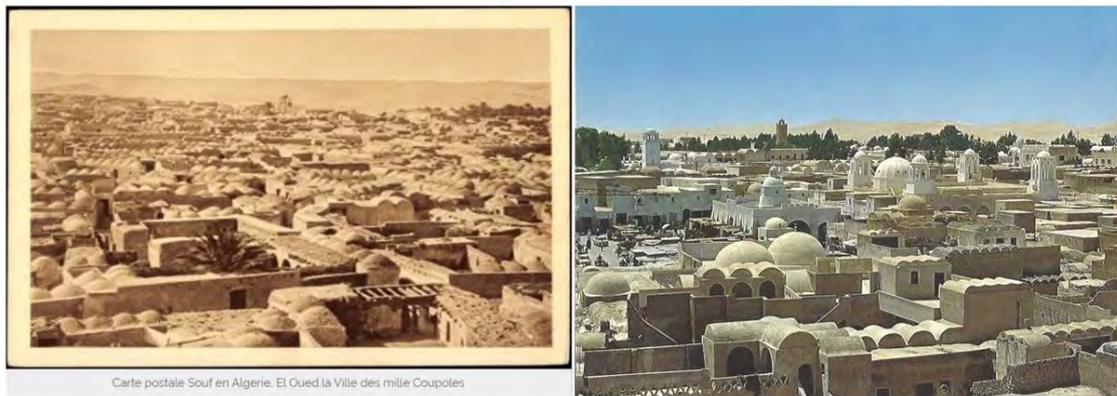


Figure 7.a. Vue aérienne montrant le paysage culturel du Souf. b. Extrait de la figure 7.a montrant le paysage naturel des Ghouts (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020).

En plus de ce paysage naturel, l'architecture du *Souf* est différente des celles des autres régions sahariennes, elle dépeint un paysage urbain unique caractérisé par l'utilisation des coupôles dans toutes les constructions. Ce paysage a été décrit par plusieurs orientalistes donnant l'appellation 'la ville aux milles coupôles' à la région (Bataillon, 1955; Ferry, 1951; Scelles-Millie, 1963), (Figure 8). Cette architecture

Chapitre 1- Le contexte historique, urbanistique et patrimoniale du Souf

émane d'un patrimoine immatériel qui est représenté par les savoirs faire transmis d'une génération à l'autre. Le mariage entre le paysage naturel et urbain se caractérise par son harmonie due à une parfaite intégration dans le contexte environnemental désertique. D'autre part, le patrimoine immatériel ne se limite pas aux techniques architecturales et agricoles, mais s'étend également aux métiers artisanaux hérités et représentatifs de l'identité de cette région comme la fabrication de tapis traditionnels et les bijoux. Les Souks de la région représentent une exposition de ces produits artisanaux depuis des siècles.



*Figure 8. Images du paysage urbain de la région du Souf
(<https://histoireislamique.wordpress.com/tag/arabes/> &
<https://histoireislamique.files.wordpress.com/2014/10/oued-souf.jpg>, consultés le 13/05/2019).*

En conséquence, les us et coutumes de la région du *Souf* ont joué un rôle dans l'inscription de son paysage culturel comme un patrimoine figurant sur la liste indicative de l'*Unesco*, pour sa valeur universelle exceptionnelle, répondant ainsi à quatre critères de sélection de la Convention du Patrimoine Mondial, à savoir :

Le critère (II) : d'exposer un échange important de valeurs humaines, sur une période de temps ou dans une zone culturelle du monde, sur les développements de l'architecture ou de la technologie, des arts monumentaux, de l'urbanisme ou de la conception du paysage ;

Le critère (III) : apporter un témoignage unique ou du moins exceptionnel sur une tradition culturelle ou sur une civilisation vivante ou disparue ;

Le critère (IV) : être un exemple exceptionnel d'un type de bâtiment, d'ensemble architectural ou technologique ou de paysage illustrant une ou plusieurs étapes significatives de l'histoire humaine ;

Le critère (V) : être un exemple exceptionnel d'établissement humain traditionnel, d'utilisation des terres ou d'utilisation de la mer qui est représentatif d'une culture (ou de cultures) ou d'une interaction humaine avec l'environnement, en particulier lorsqu'il est devenu vulnérable sous l'impact d'un changement irréversible.(UNESCO, 2002)

En attendant le classement de la région du *Souf* au patrimoine mondial, sa richesse patrimoniale est en voie d'extinction. De plus, la région n'est pas classée au niveau national, ce qui rend difficile toute tentative de préservation de ce patrimoine. Cette absence de volonté des autorités publiques de conserver les centres historiques de la région et encourager la population à respecter et développer ce legs culturel, a considérablement contribué à la dégradation de l'architecture et des noyaux urbains historiques de la région, construits depuis des siècles.

3. Contexte historique de la région et le choix de l'aire d'étude

Depuis plusieurs siècles, la région du *Souf* a été habitée par les nomades, dont le passage est justifié par la découverte des pièces de monnaie à *Guemar*. La sédentarisation de la région a commencé par la fondation des trois villages de : *Zgoum*, *Guemar* et *El Oued* dont les mosquées remontent au XVIe siècle (Coté, 2006). Ce tripode de villages avec le *Ksar* de *Kouinine* (Figure 9), constituent la plus ancienne architecture *ksourienne* dans la région du *Souf* (Coté, 2006; Delaval, 1974).

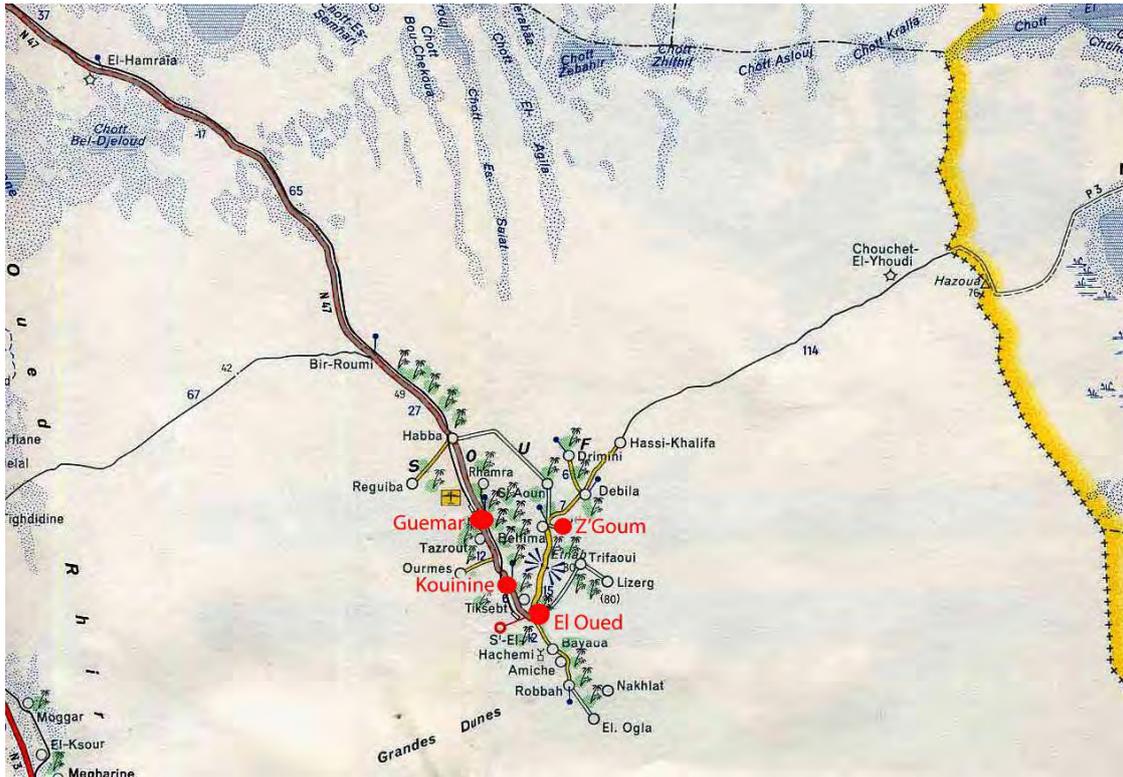


Figure 9. Situation géographique des ksour de la région du Souf. (<https://www.nachoua.com/El-Oued/sud-est-algerie.jpg>, consulté le 13/03/2018, traitement : l'auteure).

Depuis leur fondation, ces *Ksour* ont subi des formations et des transformations, constituées d'extensions et de modifications morphologiques urbaines et architecturales. De ce fait, ce changement influençait différemment le caractère architectural et urbain originel des *Ksour*, d'un *Ksar* à un autre. La préservation de l'attribut historique d'un *ksar* est l'un des critères fondamentaux pour le choix de l'aire d'étude pour la présente recherche, en addition de la diversité des typologies de coupoles qui sont indispensables dans cette sélection. Aux deux critères évoqués ci-dessus, s'ajoute la disponibilité d'une base documentaire historique et graphiques sur les *Ksour*. Dès lors, l'analyse historique de la région du *Souf* vise à déceler la présence ou pas d'autres critères de sélection, et donc, définir le *Ksar* choisi comme aire d'étude parmi les *Ksour* de la région.

En ce qui concerne le caractère morphologique architectural et urbain des *Ksour*, les différentes aires ont subi diverses interventions modificatrices depuis leurs fondations. Il semble que *Z'goum*, qui constitue le centre le plus ancien au *Souf* (Coté, 2006), soit resté un petit village, mais son image architecturale actuelle ne porte aucun trait architectural ou urbain traditionnel, car les constructions y datent généralement de la fin du 20^e et début du 21^e siècle, et sont construites avec des matériaux industriels.

En plus, il est immanquable de remarquer l'absence des coupoles dans le *Skyline* (Figure 10). La documentation architecturale et urbaine de ce site est indisponible, il est cité dans la description de l'histoire de la région du *Souf* comme étant le plus ancien de ses centres (Coté, 2005, 2006; Najah, 1971). Cela revient à la disparition du centre historique depuis certain temps.



Figure 10. Vue aérienne sur la ville de Z'Goum. (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020).

Par ailleurs, *Kouinine* a aussi connu des modifications sur son centre historique décrit par son paysage à coupoles selon (Delaval, 1974). Aujourd'hui, son caractère morphologique architectural local est défiguré pendant la période de l'industrialisation de la construction, en remplaçant les maisons traditionnelles aux coupoles dégradées par des maisons neuves avec des matériaux industriels. Actuellement, on y retrouve certaines constructions à coupoles au faubourg du *Ksar* (Figure 11). Ce dernier est étroitement abordé dans certaines références(Delaval, 1974), en projetant schématiquement la structure urbaine et l'organisation typique d'une maison à coupoles.



Figure 11. Vue aérienne sur le Ksar du Kouinine. (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020, traitement : l'auteure).

D'autre part, à l'arrivée de la colonisation française les deux centres de *Laachaache* et *Guemar* ont été décrits par plusieurs auteurs français, qui ont fait une description d'un paysage étonnant, qui se distingue par l'utilisation des coupôles dans toutes les constructions (Bataillon, 1955; Coté, 2005, 2006; Djilali, 2004; Echallier, 1968; Ferry, 1951; Scelles-Millie, 1963). Cependant, *Laachaache*, située à *El Oued*, représente la capitale administrative de la région, une capitale qui a connu plus de transformations

urbaines importantes relativement à *Guemar*. Ces mutations coloniales prennent la forme de constructions à coupoles qui se démarquent des traditionnelles, et s'intègrent dans le tissu ancien du centre, assurant la continuité architecturale et le cachet local de la région par le maintien des coupoles et les matériaux locaux (Royer, 1932). Aujourd'hui, ce centre, dont la mixité était autrefois harmonieuse, a perdu son caractère architectural et urbain, à cause de l'état de dégradation avancée des constructions dû à la remontée capillaire causé par surélévation de la nappe phréatique à *El Oued* (Khezzani & Bouchemal, 2018; Saibi et al., 2009). Les figures 12.a et 12.b, prises de la même position, montrent la défiguration du centre de *Laachaache*.

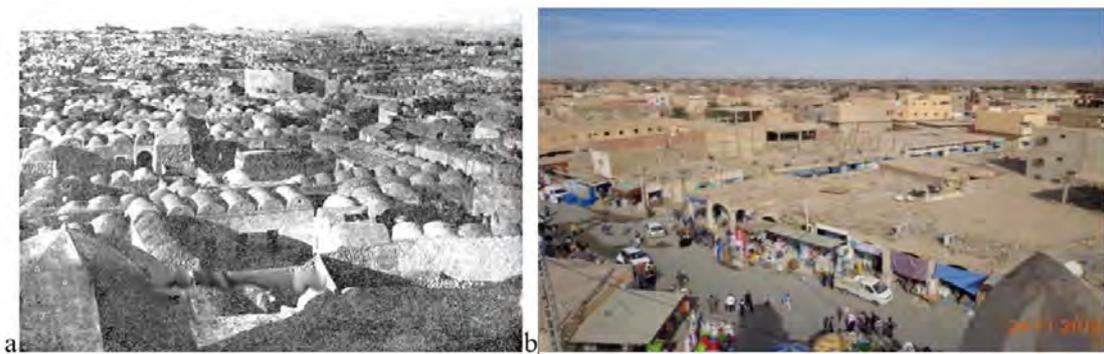


Figure 12.a. Vue sur le centre de *Laachaache*, prise au haut du minaret de la *Zaouia de Sidi Salem, El-Oued* vers 1905 (<http://alouadesouf.canalblog.com>, consulté le 15/05/2020). b. Vue sur le centre de *Laachaache* en 2012, prise au haut du minaret de la *Zaouia de Sidi Salem* (Hafiane, 2015).

En ce qui concerne le centre de *Guemar*, le niveau de la nappe phréatique diminuait durant la période de sa remontée à *El Oued* (Saibi et al., 2009), une diminution temporaire a retardé la dégradation rapide du bâti ultérieurement. Parallèlement à *El Oued*, l'intervention urbaine pendant la période coloniale française a constituée une extension autour du noyau historique de *Guemar*, tout en préservant son entité existante et son caractère historique, avec une continuité dans l'utilisation des coupoles et des matériaux locaux. En effet, *Guemar* est le centre qui préserve le plus son caractère originel par rapport aux autres centres (Figure 13.a), bien que son état de conservation demeure actuellement critique (Figure 13.b).



Figure 13.a. Vue sur le centre de Guemar, début des années 90 (Sébe, 1991). b. Vue sur le centre de Guemar (l'auteure, 2019).

En conclusion, cette brève analyse, basée sur plusieurs critères de choix de l'aire d'étude, montre que *Guemar* est le *Ksar* le plus adéquate pour répondre à la problématique et aux objectifs de la présente recherche. Ceci se justifie, d'abord, par la préservation du caractère historique de *Guemar* tandis que l'image des autres centres est défigurée, puis la préservation de son noyau et son extension coloniale. Une diversité typologique architecturale est présente dans le *Ksar*, et malgré la rareté des documents historiques et graphiques sur la région du *Souf*, *Guemar* possède quelques descriptions et analyses remontant à la période coloniale. Dès lors, le *Ksar* de *Guemar* est le plus étudié historiquement. C'est suite à cette documentation présente dans la *Zaouia Ettidjanina*, que se définissent les objectifs et la structure pour atteindre les objectifs de la continuité de ce travail, notamment la stratification du *Ksar*.

4. Stratification historique et Analyse urbaine de *Guemar*

La stratification historique de l'aire d'étude, *Ksar* de *Guemar*, vise à comprendre les formations et les transformations qui servent à définir la morphologie urbaine et architecturale existante et leur évolution dans le temps, depuis la fondation de *Ksar* jusqu'à aujourd'hui. Cette étude des permanences structurelles permet l'identification typologique urbaine et architecturale, autrement dit la classification typologique des agrégats et des maisons traditionnelles. En outre, elle permet aussi la classification des coupoles existantes dans ce tissu pour chaque période. Les résultats de la stratification historique servent à analyser les modes de constructions à *Guemar*, cela pourrait être relativement généralisée sur les autres *Ksour*, grâce à l'existence des différentes analogies entre eux (Figure 14), un résultat des échanges internes dus aux courtes distances séparant les *Ksour* du *Souf* (Mangin & Panerai, 1978).

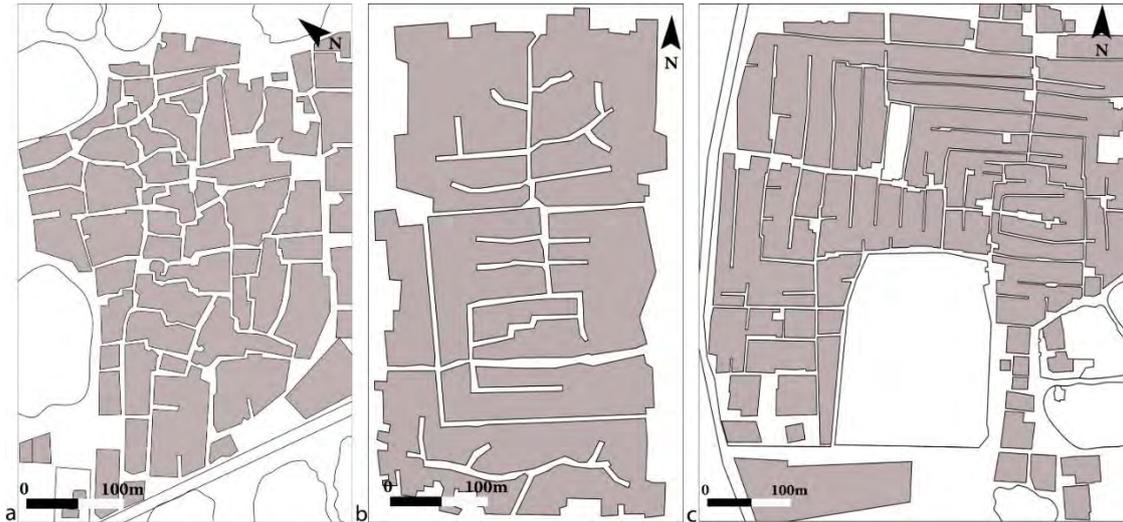


Figure 14. a. Structure urbaine de Laachaache, El Oued (réalisé par l'auteure, selon (Coté, 2005)). b. Structure urbaine de Kouinine (réalisé par l'auteure, selon (Delaval, 1974)). c. Structure urbaine de Guemar (réalisé par l'auteure, selon (Mangin & Panerai, 1978)).

Selon (Echallier, 1968; Mangin & Panerai, 1978), la fondation du Ksar de Guemar a eu lieu en 1597, par la construction de la mosquée *Sidi Messaoud*. C'est autour de cet édifice, que s'est greffé le premier noyau historique du Ksar vers la fin du 16^e siècle, un noyau de forme rectangulaire contenant une soixantaine maisons (Figure 15). Il semble que ce noyau fût entouré d'une muraille dotée d'une porte à l'Ouest '*Bab El Chargui*' (Mangin & Panerai, 1978). Cette dernière est toujours existante, mais ses dimensions ont été réajustées aux exigences actuelles pour permettre le passage des voitures (Figure 16). Dans cette même période, à l'extérieur de la muraille, un cimetière s'était formé au Sud-Ouest du noyau historique, et le *Souk* avait été implanté à l'Ouest, à proximité la porte '*Bab El Chargui*' (Figure 15).

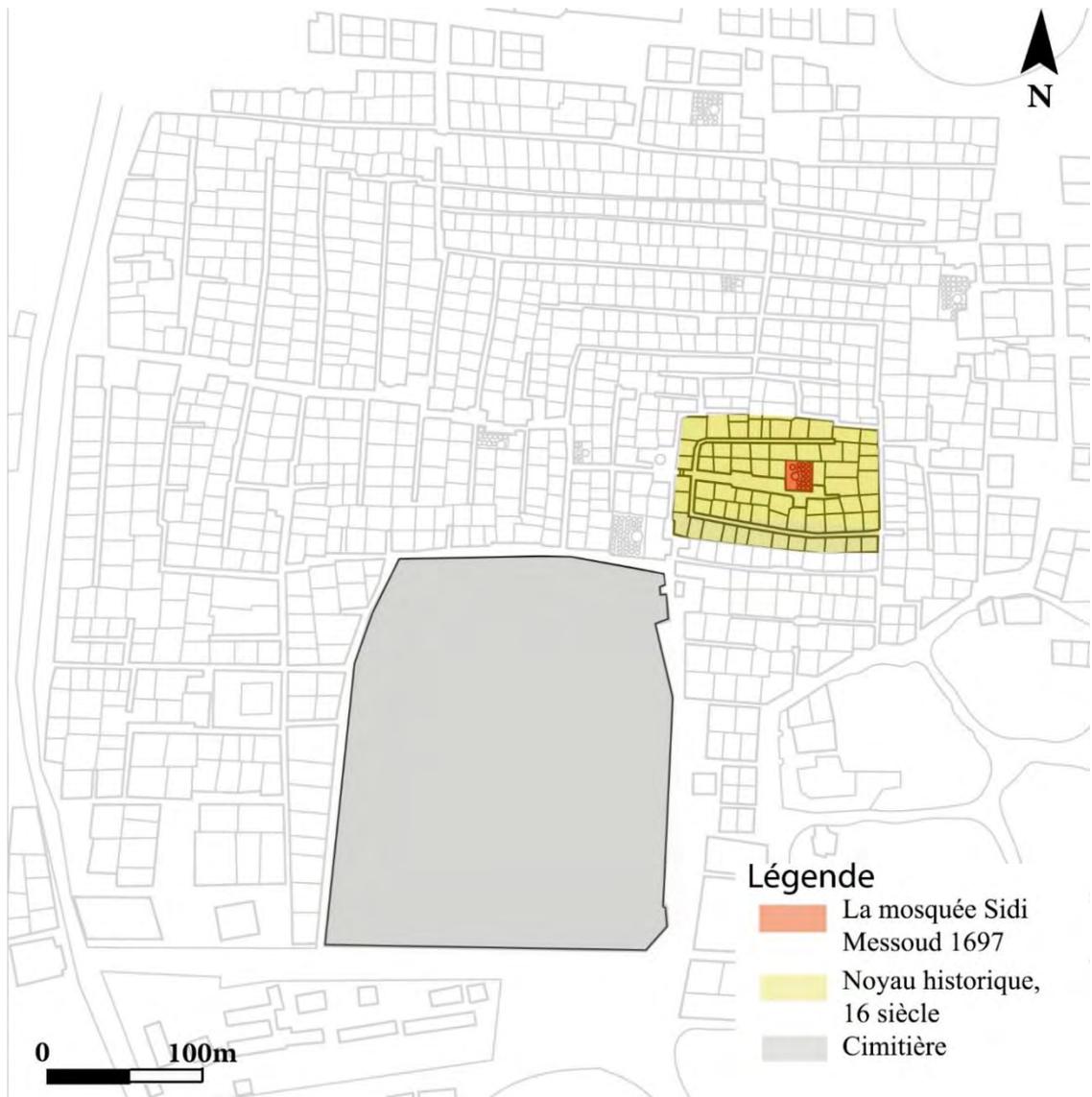


Figure 15. Stratification historique du Ksar de Guemar : le noyau historique (réalisé par l'auteur, selon (Mangin & Panerai, 1978).



Figure 16. a. L'ancienne porte "Bab El Chargui" (Google Maps, consulté le 5/2/2019). b. La nouvelle porte "Bab El Charguia" (l'auteur, 2017).

Au début du 17^e siècle, selon les deux directions, Nord et Ouest, le noyau historique se développait suivant le principe de l'évolution par homothétie du rectangle originel. Cette extension peut être divisée en deux parties : la première partie s'est faite pendant le 17^e siècle ; la seconde partie entoure la précédente, et a connu une progression relativement lente pendant le 18^e siècle, en joignant à l'Ouest le quartier *Ouled Hamid*, qui a été construit dans un faubourg au milieu de ce même siècle (Figure 17). D'après (Mangin & Panerai, 1978), Il paraît que le *Ksar* de *Guemar* eût une deuxième enceinte de forme rectangulaire (environ 300 sur 500m de longueur), qui entourait l'extension du noyau, et la séparait de son faubourg y compris le quartier *Ouled Hamid*. Cependant, cette hypothèse reste générale, car selon (Bataillon, 1955; Echallier, 1968), les *Ksour* du *Souf* ne se caractérisent pas par le recours aux enceintes défensives et de sécurité grâce à l'isolement de la région.

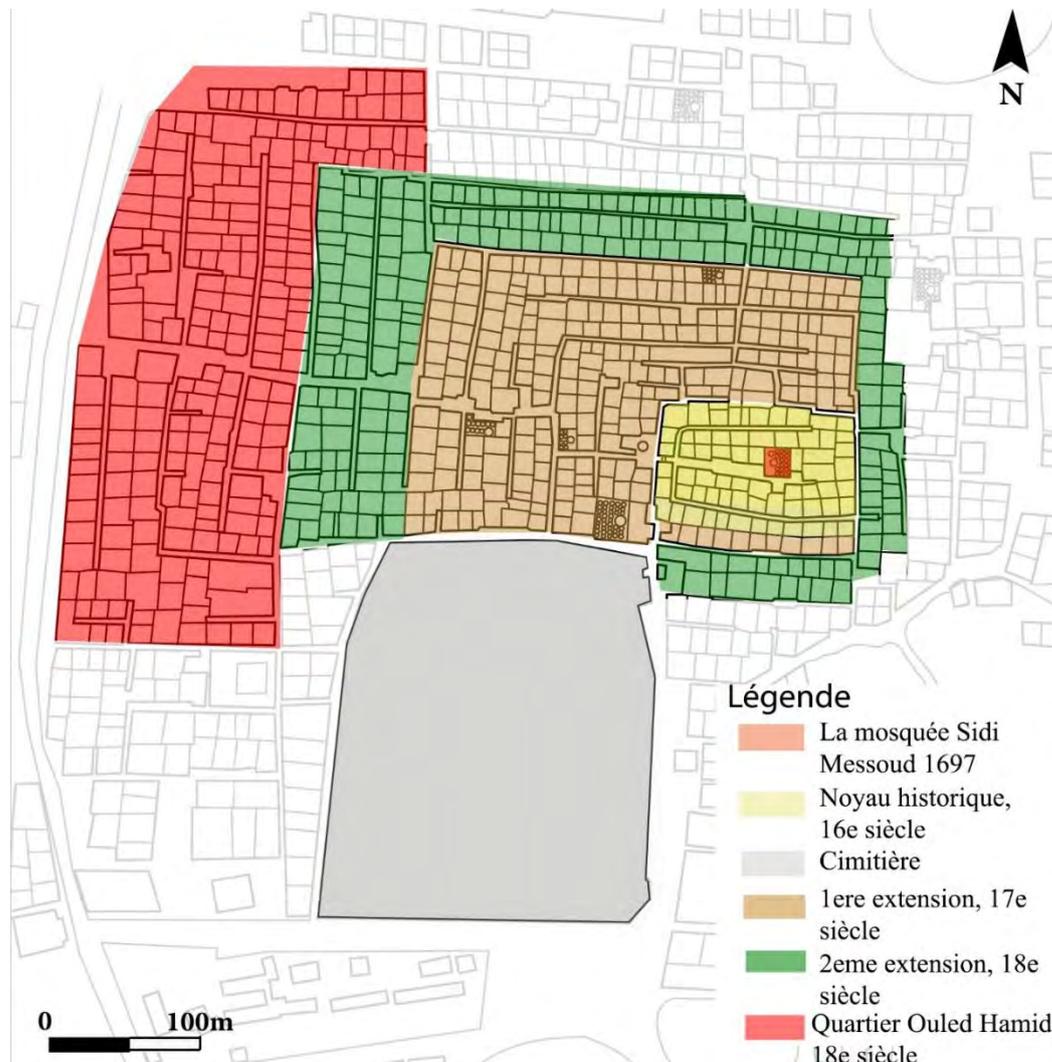


Figure 17. Stratification historique du Ksar de Guemar : extensions urbaines (réalisé par l'auteur, selon (Mangin & Panerai, 1978)).

Entre le 18^e et le 19^e siècle, *El Zaouïa Ettidjania* avait été construite à l'Est, rattachée à l'extension de noyau historique (Figure 18). Elle représente la composition monumentale la plus achevée de l'architecture urbaine du *Souf*, en contenant une école coranique, une mosquée, une bibliothèque ...etc. Elle avait également connu des formations et de transformations depuis sa construction, entreprises par les habitants de la région, et par les français pendant leur période de colonisation (Mangin & Panerai, 1978).

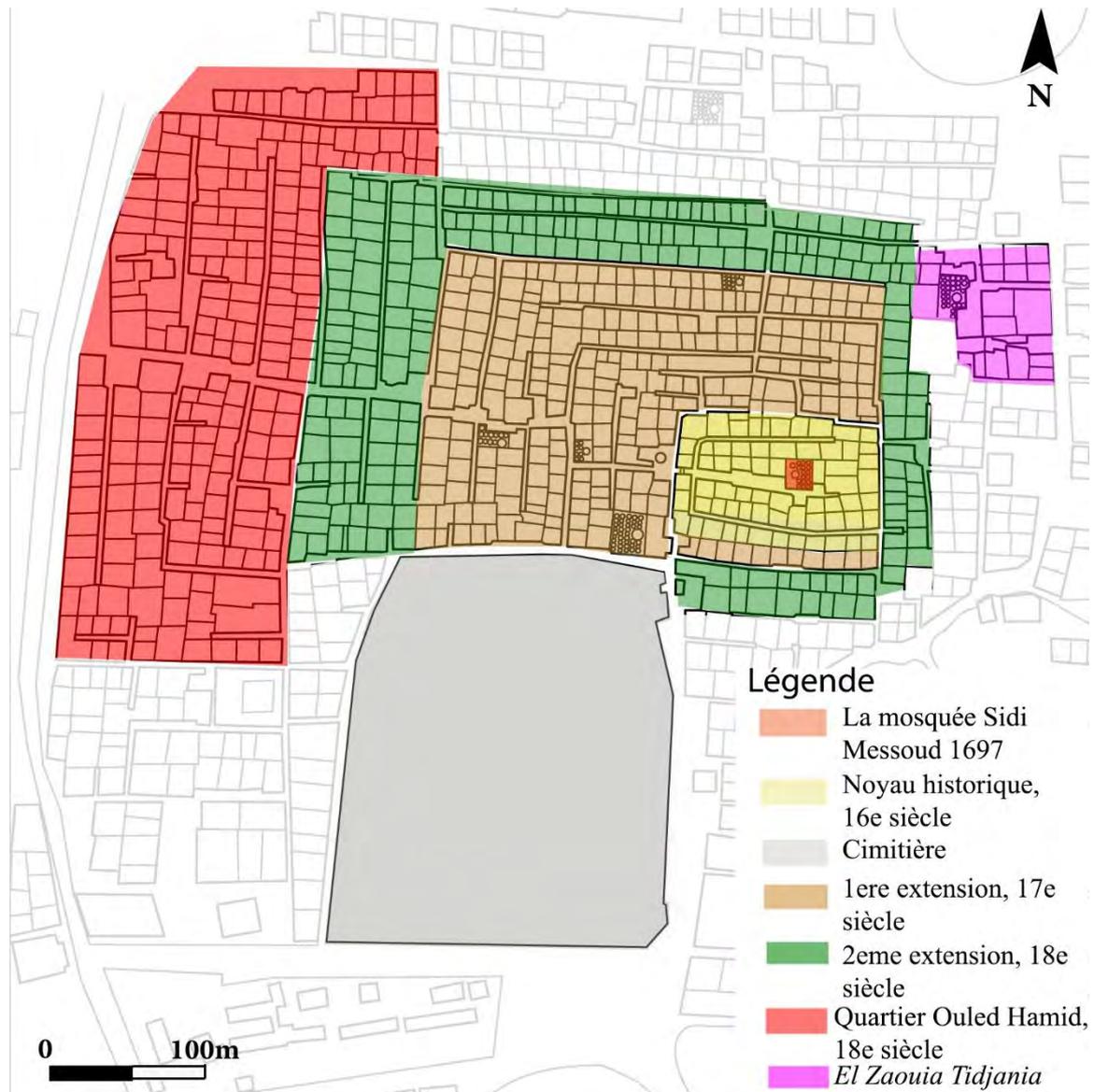


Figure 18. Stratification historique du Ksar de Guemar : La Zaouia Ettidjania (réalisé par l'auteure, selon (Mangin & Panerai, 1978)).

Au 19^e et au 20^e siècles, la masse urbaine existante avait connu la continuité des extensions nouvelles locales ou coloniales concentrées dans la partie Nord et Sud, (Figure 19& 20.a). Actuellement, *Guemar* constitue une banlieue au milieu des sables,

elle reflète un paysage caractérisé par l'unicité de l'utilisation des coupôles et certaines voûtes en berceau introduites ultérieurement. *Guemar* a commencé à perdre ce caractère en raison de la disparition de certaines maisons traditionnelles, en les remplaçant par de nouvelles constructions qui ne respectent pas l'ancienne typologie des maisons (Figure 20.b).

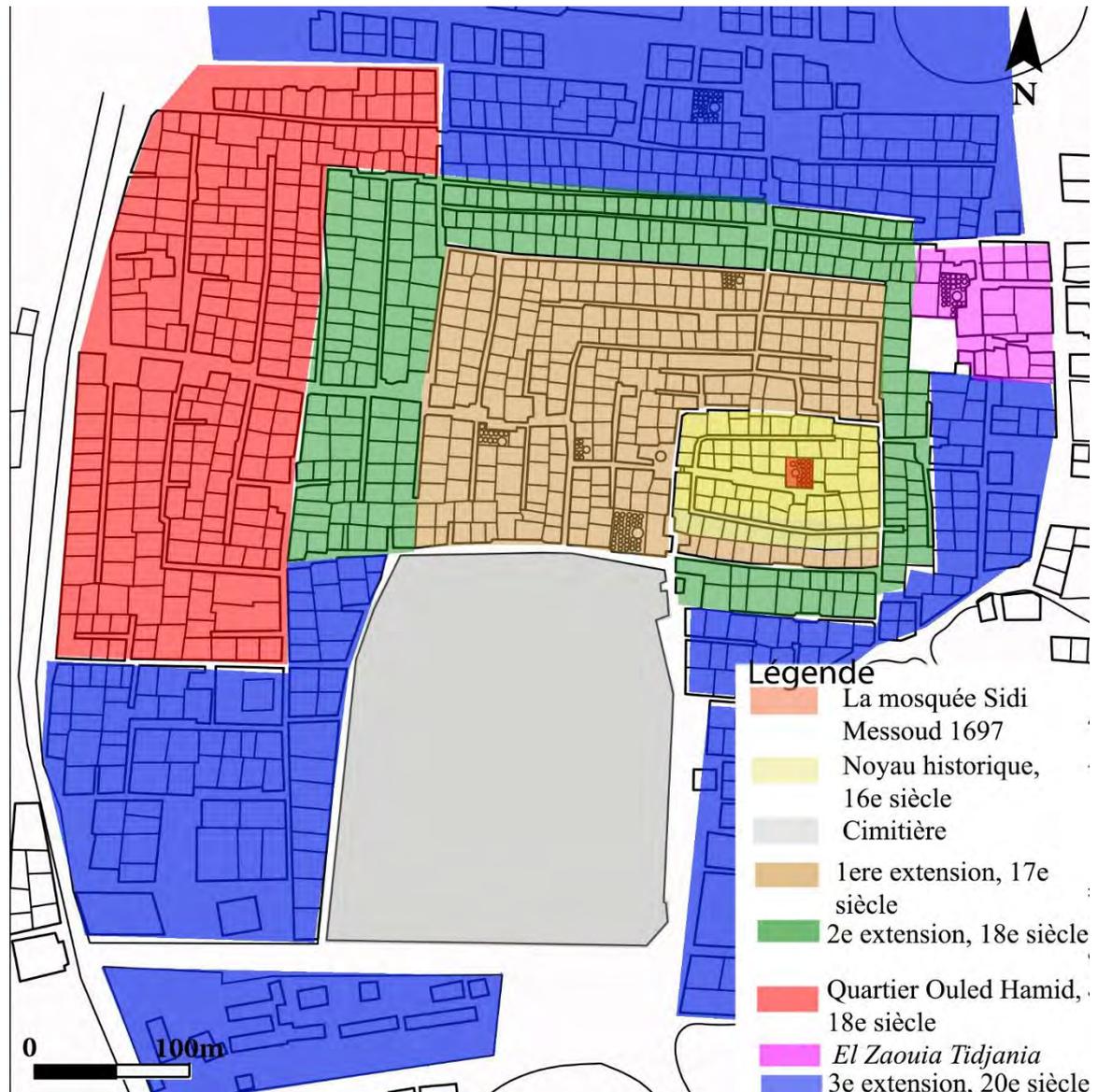


Figure 19. Stratification historique du Ksar de Guemar : 3e extension urbaine (réalisé par l'auteur, selon (Mangin & Panerai, 1978)).



Figure 20.a. Vue aérienne sur le ksar de Guemar, 1947 (Google Maps, consulté le 5/2/2019). b. Ancienne et nouvelle constructions, Ksar de Guemar (l'auteure, 2019).

5. Analyse morphologique urbaine et architecturale

La stratification historique de *Guemar* et l'analyse de la morphologie urbaine et architecturale servent à étudier la configuration urbaine et sa relation avec la configuration de l'entité architecturale. En passant d'une échelle globale à une particulière, cette analyse sert à comprendre d'une part le paysage urbain et le fonctionnement de l'espace urbain, relativement à la morphologie et formes architecturales. Elle permet d'autre part d'identifier les éléments architecturaux et leurs caractéristiques techniques, fonctionnelles et morphologiques. Cela est un passage important pour la compréhension de la structure des maisons à coupoles et ses éléments constitutifs (Figure 21).

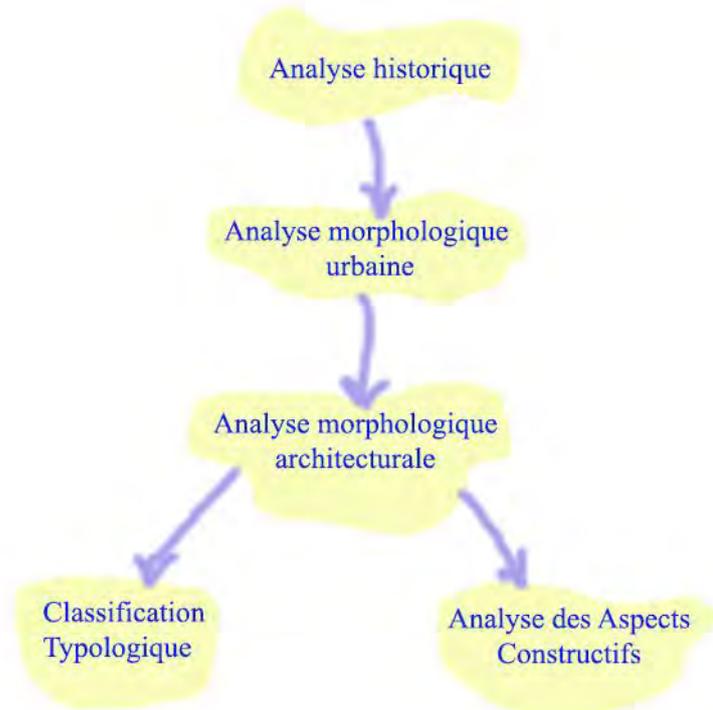


Figure 21. Schéma explicatif de l'analyse morphologique (L'auteure).

A l'échelle urbaine et architecturale, bien que le tissu urbain du centre historique de *Guemar* semble être similaire, une certaine diversité se distingue tangentiellement au facteur chronologique. Par conséquent, le processus d'analyse de la structure morphologique urbaine et architecturale suit l'ordre chronologique de formation et de transformation du *ksar*.

a) *Structure morphologique urbaine du centre historique de Guemar*

Le noyau historique, constitué d'un seul agrégat, se compose d'une soixantaine de maisons (Figure 22.a). A l'Ouest, en y accédant à l'intérieur par la porte *Bab el Charghi*, on retrouve trois ruelles suivant une direction Ouest-Est. La ruelle au milieu, passe par la mosquée *Sidi Massoud* et se prolonge en impasse, tandis que les deux autres sont orientées Sud et Nord et qui se retournent en impasse suivant la direction Ouest-Est. Les trois impasses se rejoignent à l'extrémité en bifurcation du bâti. Les ruelles et les impasses s'organisent de manière orthogonale. En effet, les groupements des maisons de cet agrégat ont des formes rectangulaires, mais avec deux configurations. La première résulte d'une série de maisons contiguës dans une seule direction. Cette configuration concerne les maisons qui constituaient l'enceinte du noyau, et donnant sur l'impasse. Mais après l'apparition de la première extension, de nouvelles maisons

ont été accolées à certains de ces groupements. La deuxième configuration consiste en deux séries jointes de maisons adjacentes dans une seule direction, entourées de part et d'autre par deux impasses (Figure 22.b).

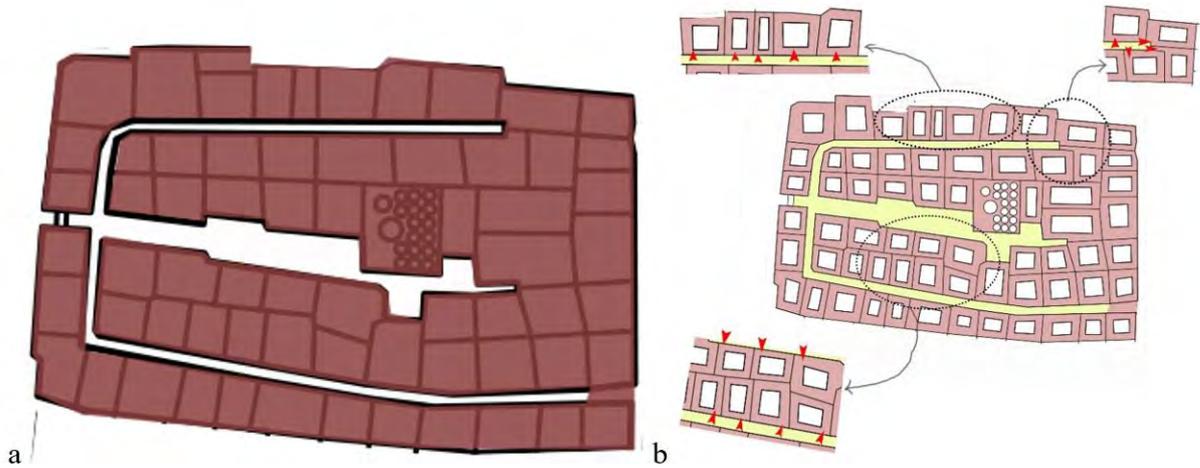


Figure 22.a. Morphologie urbaine du noyau historique (L'auteure). b. Configuration et regroupement des maisons (L'auteure).

Sachant que l'extension urbaine du noyau se faisait par le principe de déformation par homothétie, la croissance du tissu urbain avait généré une organisation orthogonale. Le *Souk*, qui est apparue à l'extérieur du noyau historique, constitue le point de convergence reliant l'extension à son noyau historique. Ainsi, les ruelles sont reliées à ce *Souk* suivant une trame orthogonale, perpendiculaire à celles-ci, jaillissent des impasses donnant une structure en arborescente (Figure 23). En conséquence, cette continuité entre les deux tissus a permis d'avoir des agrégats similaires, caractérisés par la contiguïté d'une ou deux séries de maisons jointes dans une seule direction et entouré de part et d'autre de ruelles ou d'impasses. L'agrégat peut être constitué d'un seul groupement rectangulaire, ou l'accolement d'un ou plusieurs groupements perpendiculairement à un ou plusieurs rectangles, par le fait d'avoir des impasses qui permettent ces branchements (Figure 24). Ces groupements rectangulaires se caractérisent aussi par leur longueur importante. S'il n'y a qu'une seule série de maisons, l'accès peut se faire dans l'une des deux ruelles ou impasses qui les bordent. Les ruelles et les impasses sont conçues étroites, destinées uniquement pour le passage des piétons, elles fournissent également de l'ombre dans cette zone désertique (Figure 25).

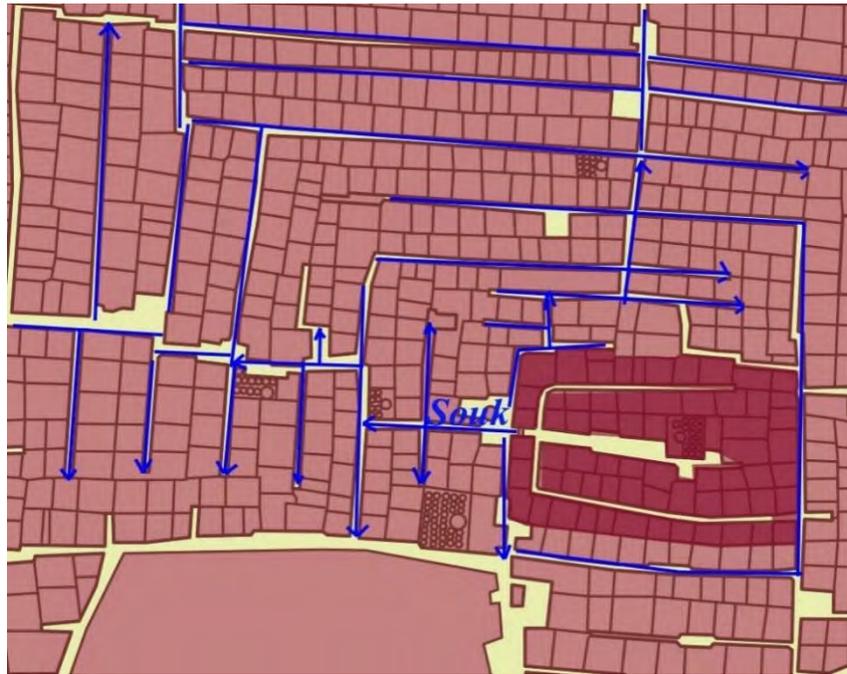


Figure 23. Morphologie urbaine du tissu des extensions, (L'auteure).

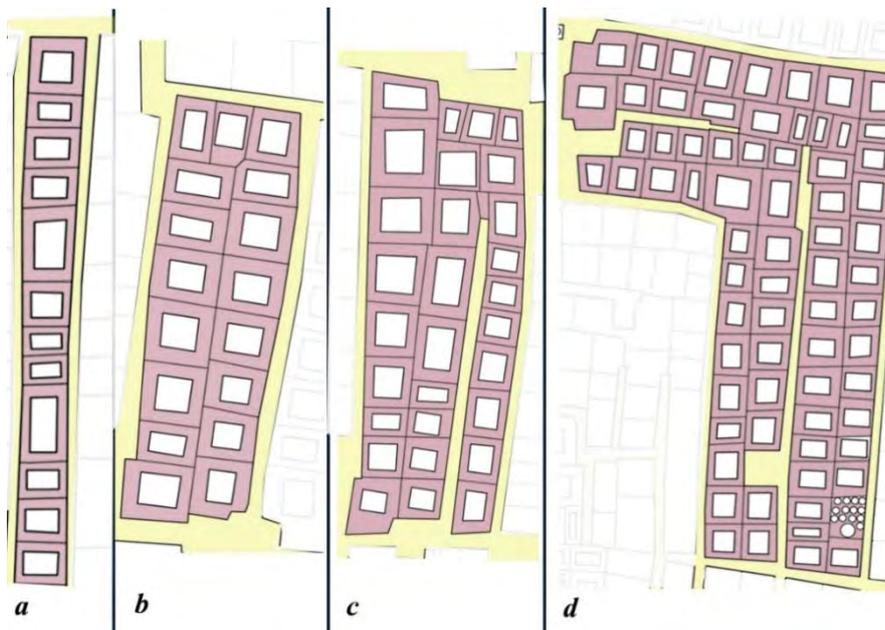


Figure 24. Typologie urbaine des agrégats. a. Agrégat rectangulaire d'une seule ligne de maisons. b. Agrégat rectangulaire de deux lignes jointes de maisons. c. Agrégat : branchement de deux groupements rectangulaires de maisons. d. Agrégat : branchement de plusieurs groupements de maisons dans deux directions, (l'auteure).

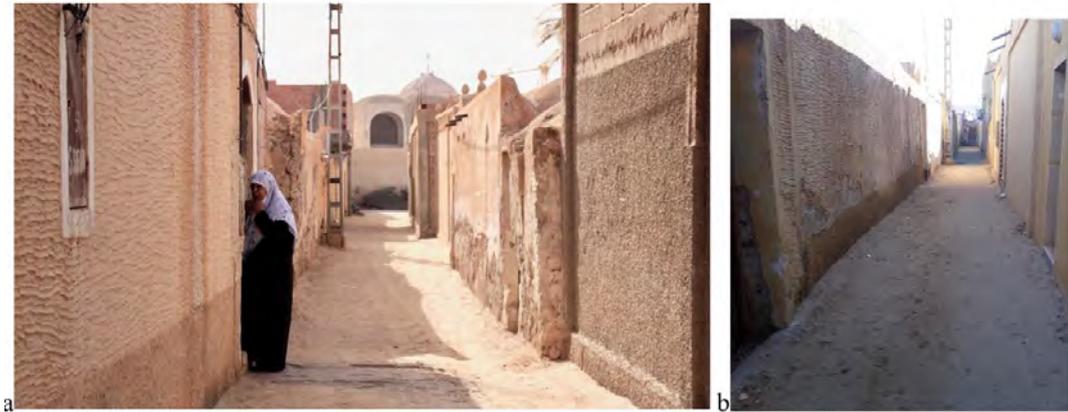


Figure 25. Typologies de système viaire à Guemar : a. Image d'une ruelle à Guemar. b. Image d'une impasse à Guemar (l'auteure, 2019).

Ces principes urbains et cette organisation se retrouvent aussi dans le quartier *Ouled Hamid*. En conséquence, le tissu urbain se forme de plusieurs unités principales structurées en arbre (Figure 23). La connexion d'une structure à l'autre se matérialise par un passage ou une ruelle, et assure une transition hiérarchique. Aujourd'hui, l'effondrement de quelques maisons a permis l'apparition des placettes au milieu de ce tissu.

D'autre part, le tissu colonial du 20^e siècle est détaché de tissu traditionnel (Figure 26). Dans ce cas, il se regroupe sous forme d'ilots constitués des maisons coloniales attachées créant des géométries rectangulaires ou irrégulières. Ces constructions se situent à l'extérieur du tissu traditionnel qui est entouré par des grandes rues.

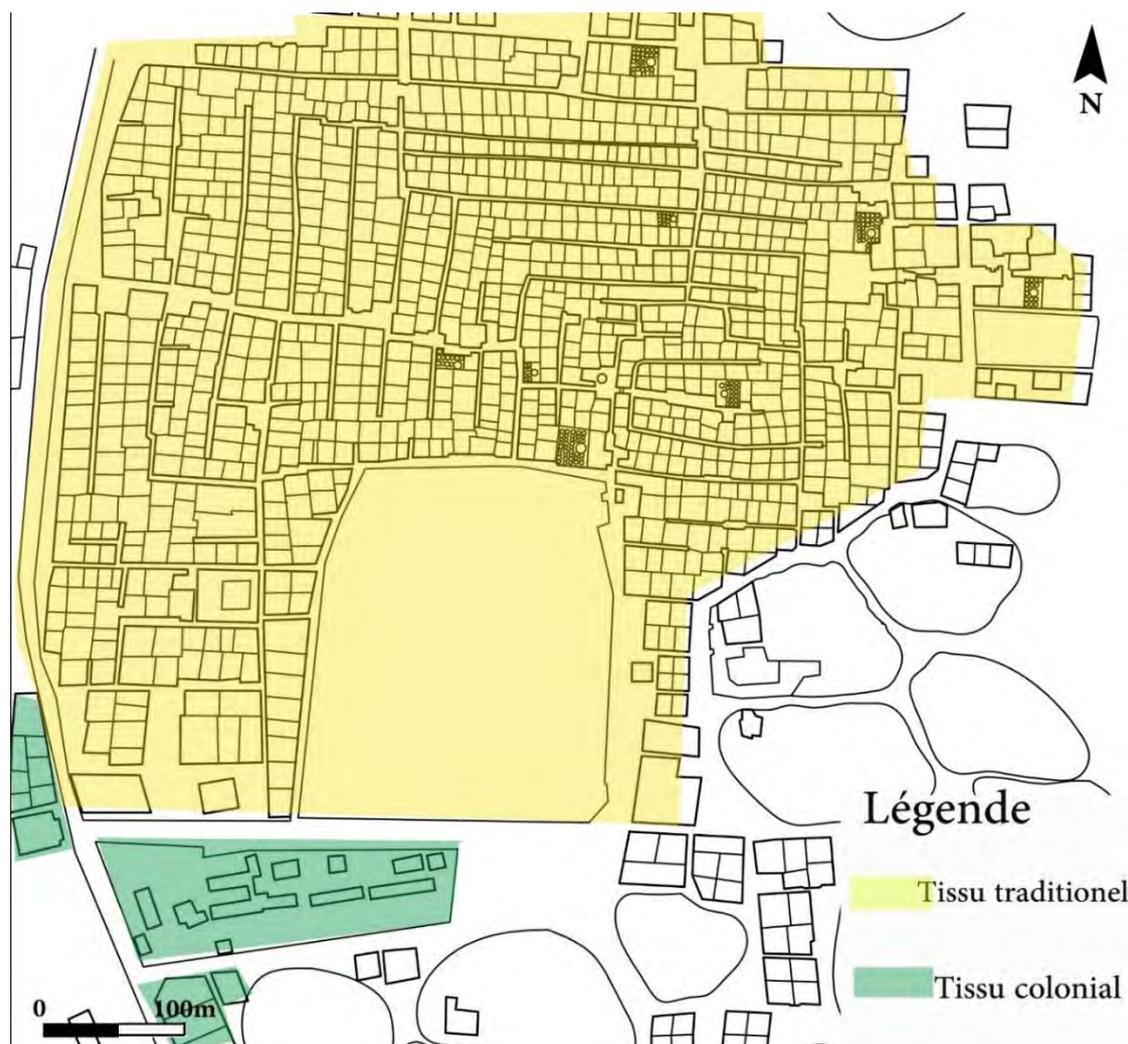


Figure 26. Typologies des tissus urbains à Guemar, (l'auteure).

Bien que la croissance urbaine de *Guemar* se soit développée pendant plusieurs siècles, l'ensemble du tissu urbain de *Guemar* se caractérise par une configuration orthogonale hiérarchisée avec une structure en arbre. Les types de groupements de maisons sont restés similaires dans tout le tissu urbain. Ces typologies sont le résultat de la croissance de la ville grâce à la répétition de l'agencement des maisons adjacentes, qui sont généralement introverties avec des ouvertures donnant uniquement sur la cour centrale (Figure 27).

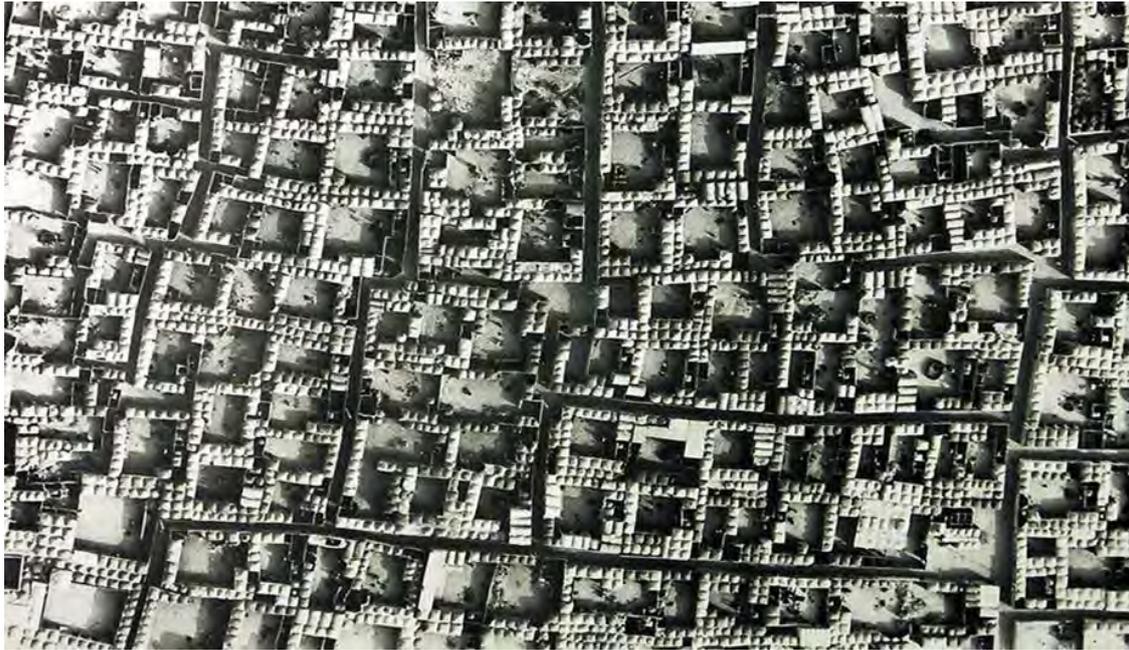


Figure 27. Vue aérienne sur Guemar, montrant l'organisation morphologique de maisons (<https://poster-gallery.com/> consulter le 05/05/2019).

b) Morphologie architecturale des maisons

Selon l'analyse à l'échelle urbaine, les maisons du tissu traditionnel, appelées localement *Haouche*, sont adjacentes et forment des agrégats. Cette disposition est le résultat de l'organisation morphologique des maisons introverties, dont toutes les ouvertures sont orientées vers l'intérieur, autrement dit, vers la cour centrale. Cette dernière a une forme carrée ou rectangulaire, et autour d'elle s'organisent les cellules à coupoles d'un seul niveau (Figure 27).

La composition architecturale des maisons est quasiment semblable dans l'ensemble du tissu traditionnel. En effet, d'une part les maisons à cour peuvent avoir une ligne continue ou discontinue des cellules à coupoles entourant la cour intérieure, cette ligne dessine le contour de la maison (Figures 28.a, b, c & d). Ces espaces couverts de coupoles ont généralement une forme carrée de 1.80m x1.80m à 2.5m x2.5m approximativement. L'espace de la maison est composé d'une cellule à coupole, qui représente l'unité de l'espace, ou d'une combinaison de plusieurs unités. Dans le dernier cas, une arcade est mise en place entre les cellules au lieu d'un mur plein. D'autre part, l'autre type de composition architecturale est représenté par une maison à cour en rajoutant un portique (Figure 28.e). Ce dernier constitue un seul espace composé de plusieurs cellules, qui sont accolées à l'une des lignes de cellules à coupole. Ce portique est au côté Sud, et s'ouvre sur la cour par des arcades vers le nord pour

garder toujours l'ombre. Il constitue en même temps un espace de transition vers d'autres espaces.

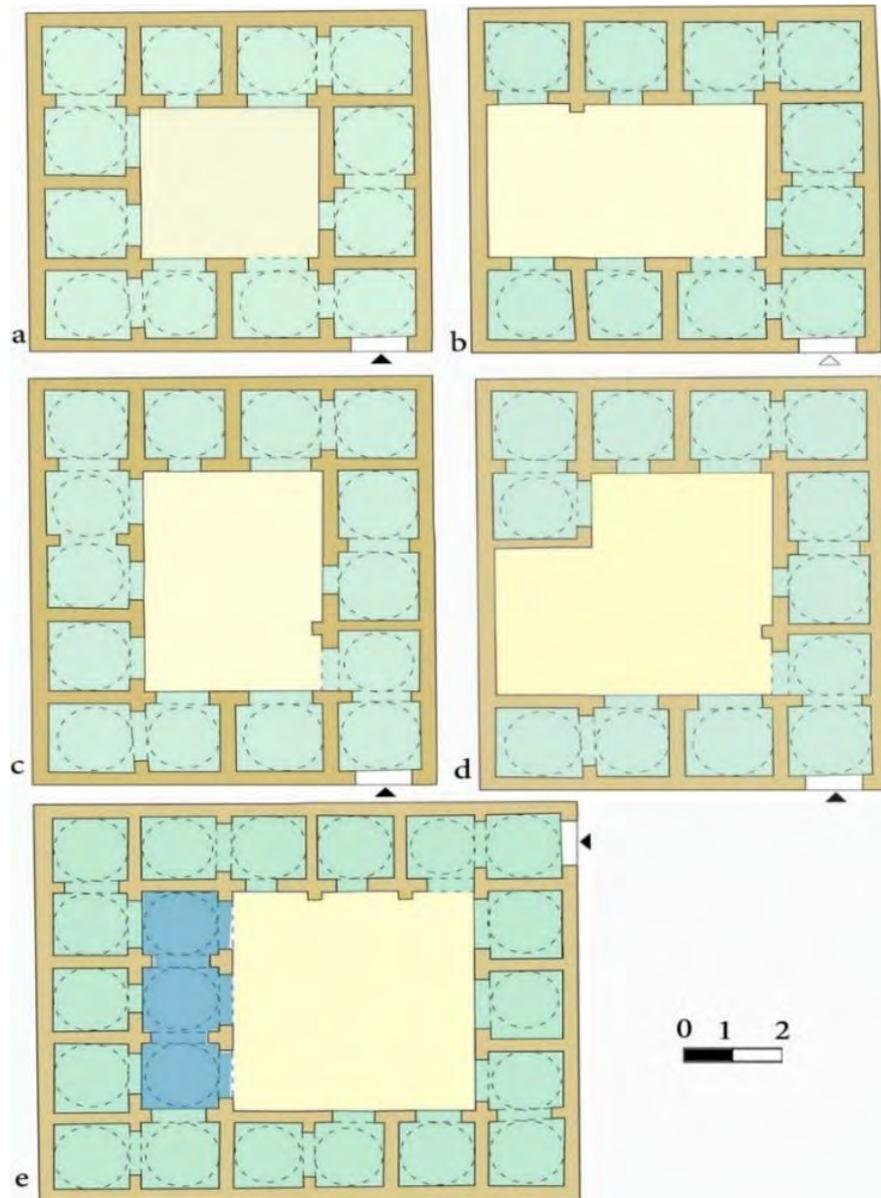


Figure 28. Typologies architecturales des maisons à Guemar. a. Maison traditionnelle à cour de forme carrée avec une ligne des cellules à coupoles continuée. b. Maison traditionnelle à cour de forme carrée avec une ligne des cellules à coupoles discontinuée. c. Maison traditionnelle à cour de forme rectangulaire avec une ligne des cellules à coupoles continuée. d. Maison traditionnelle à cour de forme rectangulaire avec une ligne des cellules à coupoles discontinuée. e. Maison traditionnelle à cour avec portique (l'auteure).

D'un point de vue formel, ces deux typologies de combinaison peuvent être rectangulaires ou carrées, cela dépend des dimensions de la parcelle de construction. Du fait qu'une cellule à coupole mesure entre 1.80 m et 2.5m, le nombre de cellule des coupoles dépend relativement des dimensions du terrain. Il est remarquable que les maisons du noyau historique et son extension aient des dimensions proportionnellement

petites par rapport à celles des autres extensions. En effet, les maisons carrées du noyau historique et sa première couronne, peuvent avoir un nombre de coupoles variant entre quatre à six cellules par côté, et rarement sept par sept cellules. D'autres part, les maisons de forme rectangulaire peuvent avoir quatre à sept cellules à coupole dans l'un de ses côtés. En ce qui concerne le quartier de *Ouled Hamid* et les autres extensions, la géométrie dominante est la forme rectangulaire, et le nombre des cellules à coupoles peut y atteindre jusqu'à onze cellules par côté, du moment que les dimensions des maisons peuvent avoir au maximum 2,5m x 11.

D'autre côté, apparaissaient les maisons hybrides, qui sont des maisons des deux typologies précédentes ont subi des dégradations, suite à l'effondrement des coupoles. A la place de ces coupoles, des voûtes étaient introduites lors des opérations de réhabilitations, celles-ci prennent différentes typologies à savoir les voûtes croisées et voûtes en berceau, qui est la plus dominante. Une coupole ou une série de coupoles effondrées peut être remplacée par une seule voûte en berceau, ou bien une série de petites voûtes en berceau (Figures 29.a& 29.b). Les voûtes en berceau ont été inspirées des maisons de l'époque coloniale de la région.



Figure 29.a. Voûte en berceau, maison traditionnelle modifiée, Guemar (l'auteure, 2019). b. Série des voûtes en berceau, maison traditionnelle modifiée, Guemar (l'auteure, 2019).

Ces maisons se caractérisent toujours par une entrée en chicane matérialisée par un petit espace couvert par une coupole (Figure 30.a), mais également, par une série d'arcade ouvertes qui donne sur la cour centrale de la maison et constitue l'espace le plus important dans toute maison traditionnelle (Figure 30.b). En outre, un élément important se retrouve dans la cour centrale de chaque maison, et qui joue un rôle dans paysage naturel du centre, qui est le palmier (Figure 30.c&d). En plus des fruits qu'ils donnent, ces palmiers sont aussi une source d'ombre dans la cour centrale. Vu leur importance, ils se retrouvent aussi dans les jardins des maisons coloniales françaises.



Figure 30. a. Porte et espace d'entrée, maison traditionnelle, Guemar (prise de l'intérieur de la maison par l'auteur, 2019). b. Galerie des arcades donnant sur la cour centrale d'une maison traditionnelle Guemar (l'auteur, 2019). c & d. Palmier, l'élément important dans la cour centrale d'une maison traditionnelle, Guemar (l'auteur, 2019).

Comme il est mentionné dans la partie de stratification de la ville, autour du tissu traditionnel, se trouve l'extension coloniale. L'organisation de ses maisons est différente de celle du tissu traditionnel à cours, et le système de couverture présente une combinaison des coupoles et voûtes en berceau de grandes dimensions relativement à celles des maisons traditionnelles (Figure 31).



Figure 31. Maisons coloniales, Guemar (l'auteur,2017).

Dans ce tissu urbain en plus de ses maisons, se trouvent plusieurs éléments singuliers à savoir les mosquées qui sont présentes dans les différents quartiers du *Ksar*, dont la plus ancienne est celle de *Sidi Messoud* (Figure 32). De plus, la *Zaouïa Ettidjania* représente le plus grand complexe monumental dans la région, par ses dimensions, le nombre des entités qu'elle contient et sa valeur auprès les habitants de la région. Elle présente aussi un monument historique qui regorge des valeurs et un legs culturel particulier qui lui ont permis d'être classée comme patrimoine nationale (Figure 1.37).



Figure 32. Mosquée Sidi Messaoud 1697, Guemar (l'auteur,2019).

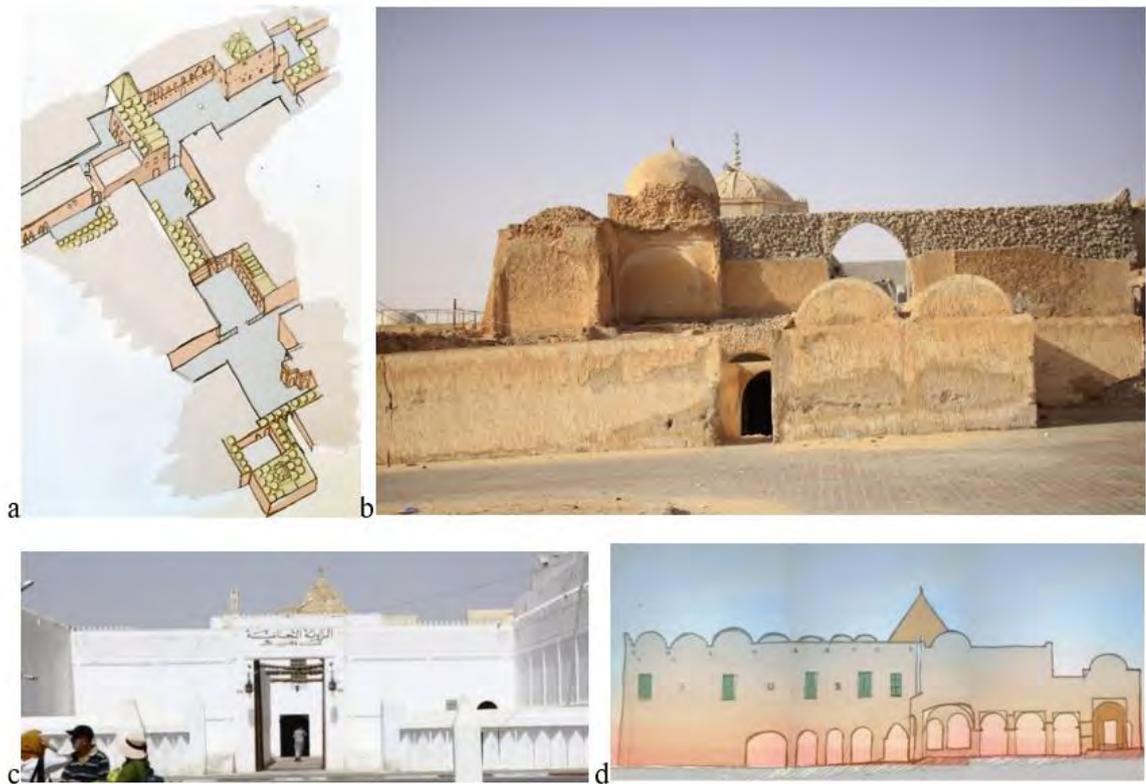


Figure 33. a. Axométrie partielle de la Zaouïa Ettidjania montrant sa composition architecturale (l'auteure). b. Façade latérale de la Zaouïa Ettidjania (l'auteure, 2019). c. Rentrée de la Zaouïa Ettidjania (Sofia Nembrini, 2019). d. Élévation intérieure de la Zaouïa Ettidjania (l'auteure).

6. Conclusion

Cette étude de la morphologie urbaine et architecturale a permis de définir les formes des combinaisons possibles des unités spatiales représentées par les cellules à coupole, pour arriver à la fin à documenter les typologies significatives des maisons, et leur évolution dans le temps. Cela sert aussi à analyser la distribution des maisons et leurs caractéristiques fonctionnelles et constructives d'une part, et à identifier les différentes typologies de coupoles d'autre part. À partir de cette étape d'analyse, la culture architecturale et constructive de la région du *Souf* sera établie.

Chapitre 2 : Culture architecturale et constructive de la région du *Souf*

L'émergence de la culture constructive du *Souf* est le résultat de plusieurs facteurs à l'image du facteur naturel, ce qui sous-entend le contexte géographique et environnemental et les conditions climatiques. D'autre part, se trouve le facteur humain, qui est constitué par la culture de la population et ses origines (Coté, 2006; Echallier, 1968; Najah, 1971). Ainsi, le paysage vernaculaire du *Souf* est intrinsèquement issu de travail combiné de la nature et l'être humain (Figure 34). Cela est relié directement aux ressources géologiques et leur exploitation de manière intelligente dans la réalisation des éléments architecturaux tels que les systèmes de couverture utilisés dans toute la région : les coupoles. L'apparition de ces éléments est due à la rareté et la cherté du coût du matériau bois du palmier dans les zones désertiques et qui permet de réaliser des traverses pour franchissement plats. Celles-ci s'ajoutent à d'autres dispositifs et techniques de construction qui sont utilisés pour garantir une certaine stabilité, en utilisant les matériaux locaux disponibles.



*Figure 34. Paysage vernaculaire de la région du Souf.
(<https://amazighouedsouf.home.blog/2018/11/02/berberes-de-oued-souf/#jp-carousel-13>, consulté le 15/06/2020).*

1. Richesse géologique et matériaux de construction

La stratification géologique du sol et sous-sol de la région du *Souf* présente une richesse en termes de diversité de matériaux disponibles. Une telle richesse locale a fortement influencé les techniques de construction adoptées d'une part, et à résoudre le problème de manque du bois dans la région désertique d'autre part (Bataillon, 1955; Najah, 1971). Ainsi, la relation entre la stratification géologique avec la construction est importante. De ce fait, l'analyse des composants morphologiques du sol et du sous-sol de la région du *Souf* est fondamentale pour la compréhension de la provenance des matériaux locaux utilisés dans la construction, leur procédure d'exploitation et de préparation pour la construction et enfin leur rôle constructif dans cette architecture vernaculaire.

Du point de vue morphologique, la zone constitue un grand bassin, sur sa surface, s'enracinent des formations quaternaires principalement composées de sables éoliens à grains fins avec des intercalations locales gypseuses et sablo-argileuses. Il peut également contenir localement des couches de 1,5 à 2 m d'incrustations de gypse salin et, à sa base, une couche de grès argileux et de carbonate. La profondeur de l'aquifère varie entre 10 à 40 m, et son épaisseur peut atteindre localement 100 m. En dessous, se trouvent des formations hétérogènes du complexe terminale constituées de calcaires perméables de Sénonien, ainsi que de sables argileux et de grès du Miopliocène. La profondeur de cet aquifère est comprise entre 100 et 600 m, et son épaisseur moyenne est de 300 m (Saïbi et al., 2009). À la base de ces formations se trouve l'aquifère Continental Intercalaire profondément confiné, contenu dans des formations du Crétacé inférieur constituées de sédiments clastiques (Bel & Cuche, 1970; Saïbi et al., 2009). En résumé, dans cette zone, les différents lithotypes sont principalement liés à l'évaporation des eaux souterraines riches en sulfates à travers un gisement de sable éolien, ce qui donne lieu à des incrustations de gypse.

Selon (Bataillon, 1955), la succession générale suivante, à partir de couches plus profondes, peut être observée au-dessus du substrat rocheux constitué par une stratification croisée de sable ferrugineux (Figure 35):

Salsala ou *Smida*: une formation de couches en bancs considérablement dures, et qui constituées de minuscules cristaux de gypse, ces cristaux sont semblables à ceux de la pierre la *Rose des Sables* « *Louz* » mais plus minces et plus serrés ;

Chapitre 2- La culture architecturale et constructive de la région du Souf

Tafza: est une pierre grise et blanche, très dure, constituée de gisement de gypse à grains très fins;

Louz: est la pierre de la *Rose des Sables*, qui constitue de cristallisations de gypse en forme de lance à l'intérieur du gisement de sable.

Il est important de noter que le gypse donne la forme et le liant aux grains de sable. Les cristaux de gypse disponibles au sol peuvent varier de moins de 1 cm (fine *Louz*) à 20-30 cm, tandis qu'au sous-sol ces solidifications de gypse, se retrouvent en couches et sous la forme de gros blocs ;

Tercha: constitue des incrustations de gypse poussiéreux à grains fins.

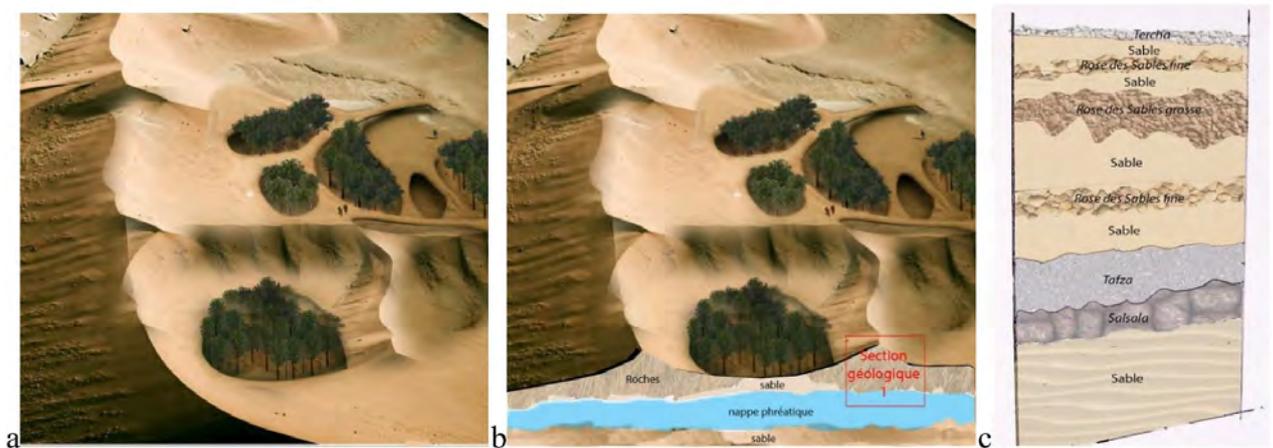


Figure 35.a. 3D du système de Ghout. b. Section schématique géologique, la région du Souf. c. Détails de la stratification géologique de la section géologique 1 (Figure 35.b), (l'auteure).

De cette diversité de roches, beaucoup de matériaux locaux sont exploités dans la construction à savoir la pierre de la *Rose des Sables* « *Louz* », la pierre de *Tafza*, et enfin la pierre de *Salsala* (Bataillon, 1955; Echallier, 1968). Chaque matériau est exploité différemment dans la construction, dès lors chacun subit un processus de transformation ou de préparation particulier, de l'extraction de la source à l'utilisation dans la construction. Cela se fait selon le rôle du matériau dans la construction à savoir le mortier de jointoiement, le plâtre et les blocs de pierre pour la construction de chaque élément architectural.

Les matériaux disponibles au sous-sol sont exploités après un processus d'extraction. Cette dernière se fait principalement, et est facilitée par la technique locale de culture typique de la région, une technique reconnue depuis des siècles. Ainsi, cette technique représente à nouveau un équilibre parfait entre les besoins humains et la

gestion du paysage. En effet, la région est connue pour les Ghouts, qui sont des micro-oasis faites par les habitants pour mettre en œuvre une technique de culture particulière (Azil et al., 2020). Fondamentalement, la zone de culture est créée en creusant les dunes afin d'atteindre la nappe phréatique (Figure 35.b& Figure 36). Au cours de ce processus, les blocs de roches sont extraits. L'extraction est réalisée avec différents outils tels que des pinces, des pioche et parfois de la dynamite (Coté, 2006; Najah, 1971). Après cette étape d'extraction, le matériau à exploiter pour le mortier et le plâtre subit un processus de transformation, et les roches à utiliser comme pierre de construction subissent un processus de préparation.

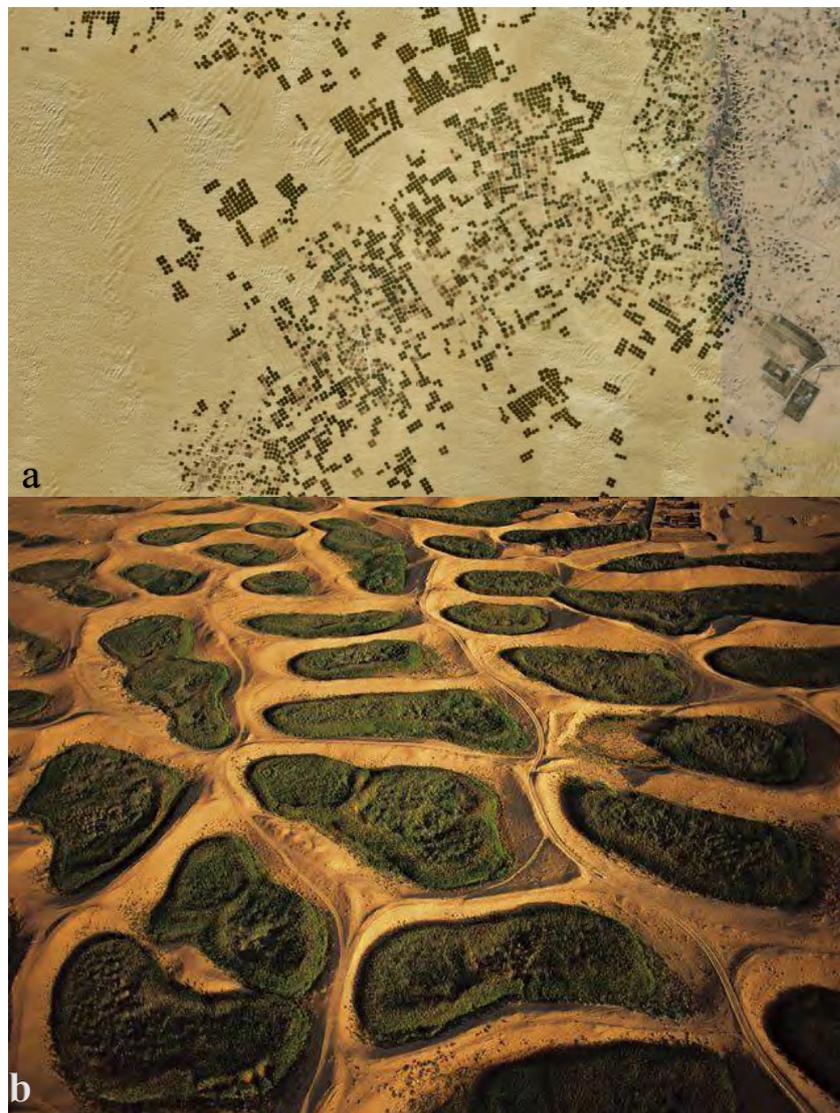


Figure 36.a. Image satellites sur les Ghouts (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020), b. Vue aérienne sur les Ghouts (<http://www.saravoyages.com/39-El-Oued.htm>, consulté le 15/06/2020).

Concernant les pierres de construction, à savoir la *Salsala* et la *Rose des Sables*-localement appelée *Louz*-, sont utilisées sous forme de gravats grossiers. D'une part,

la *Rose des Sables- Louz-* a un aspect très irrégulier, utilisée sous forme de moellons grossiers de dimensions variées pour la construction de fondations, murs et coupoles (Figure 37.a), en exploitant la pierre apparente et disponible au sol de petite dimensions (Figure 37.b), ou celle extraite de profondeur (Azil et al., 2018; Lebsir, 2016). D'autre part, la pierre *Salsala* a une forme moins irrégulière que la pierre de la *Rose des Sables – Louz-* (Figure 37.c), et elle est particulièrement utilisée pour les fondations, une utilisation limitée à cause de sa situation profonde et son extraction difficile (Lebsir, 2016).



Figure 37.a. Blocs de la pierre de la *Rose des Sables- Louz-*(l'auteure : 2019). b. pierre de la *Rose des Sables- Louz-* disponible au sol de la région (l'auteure : 2019). c. Blocs de *Salsala* (l'auteure, 2019).

En ce qui concerne la pierre utilisée comme matière première pour obtenir le liant de gypse est la pierre de couleur blanche et gris et à gros grains « *Tafza* » (Figure 38.a). Ce liant est utilisé à la fois pour le mortier de jointoiement et le plâtrage (Azil, Djebri, & Rovero, 2019; Azil et al., 2020; Echallier, 1968; Lebsir, 2016). Afin d'obtenir la

poudre de gypse, un processus de transformation nécessite plusieurs étapes en raison de la dureté de la pierre de *Tafza*. Premièrement, cette pierre est extraite des couches les plus profondes du sol. Ensuite, une période de séchage s'avère nécessaire, car elle est humide, ceci dû au contact de la pierre avec la nappe phréatique. Suite au séchage les pierres sont réduites en petits blocs. Après cela, les blocs sont brûlés pendant deux heures, dans des fours traditionnels atteignant une température de calcination comprise entre 150 -200 ° C (Azil et al., 2020; Lebsir, 2016). Les fours peuvent être creusés dans le sol ou construits avec la pierre, et doté d'une ouverture dans la partie basse pour l'alimenter en bois, et une grande ouverture au sommet pour réunir la pierre (Figure 38.b). Après cette étape, deux jours sont nécessaires pour que la pierre de *Tafza* refroidisse. Par la suite, ces blocs sont réduits en poudre et pendant cette phase, certaines cendres de bois peuvent se mélanger accidentellement avec du gypse (Azil, Djebri, & Rovero, 2019; Azil, Djebri, Rovero, et al., 2019; Azil et al., 2020; Bataillon, 1955; Lebsir, 2016). L'observation directe du mortier montre que la taille des fragments de cendre de bois varie de 1 mm à 10 mm (Figure 38.c). En raison du caractère hexogène de la poudre de gypse, un tamisage rudimentaire est nécessaire seulement pour le gypse utilisé comme plâtre pour recouvrir les surfaces de la construction (Figure 38.d).

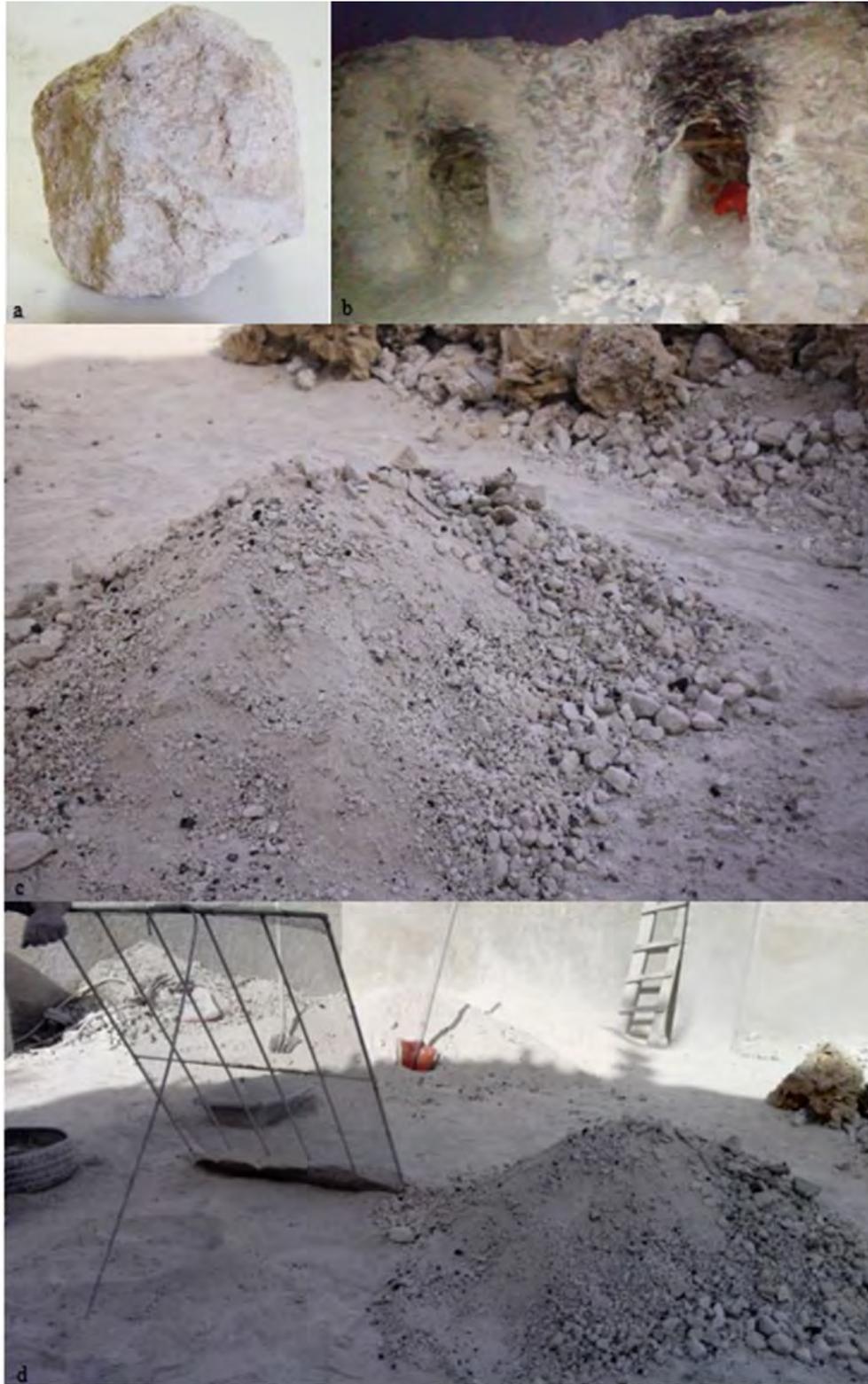


Figure 38. a. Pierre de Tafza (l'auteure, 2018). b. Fours traditionnels pour brûler la pierre de Tafza, au faubourg de Guemar (l'auteure, 2018). c. Poudre de gypse, pour le mortier de jointoiment, obtenu de la pierre de Tafza, avec des petits morceaux de la pierre non détruite et des fragments de cendre de bois, le chantier de restauration de la Zaouia Ettidjania (l'auteure, 2019). d. Opération de tamisage de la poudre de gypse pour éliminer les cendres de bois et les gros blocs de Tafza non détruite, voir aussi la poudre de gypse après le tamisage, utilisée pour le plâtrage, chantier de restauration de la Zaouia Ettidjania (Giulia Misseri, 2019).

2. Eléments architecturaux, techniques et processus de construction

Comme toutes les cultures constructives vernaculaires, celle de la région du *Souf* est basée sur des processus constructifs codifiés qui se transmettent oralement depuis des siècles. Des entretiens avec d'anciens maîtres constructeurs de la région et des enquêtes approfondies *in situ* ont permis de détecter et d'étudier la technique de construction utilisée et les processus qui caractérisent l'architecture analysée (Figure 39). Cela se fait à travers un travail d'analyse sur l'architecture et les matériaux utilisés, ainsi que la modélisation des processus de construction. Par conséquent, la recherche technique se concentre sur la reconnaissance et la compréhension du système constructif de l'architecture à coupole en *Rose des Sables*, et ses éléments.



Figure 39. Photos prises lors des interviews avec le maître du chantier restauration de la Zaouia Ettidjania (Sofia Nembrini, 2019).

La reconnaissance et la compréhension du système architectural et constructif visent, d'une part, à identifier, caractériser et documenter le système du bâtiment (éléments et relations), d'autre part, à identifier et modéliser le processus de construction. Ceci est à travers une méthode de recherche qui est basée sur différents types d'analyses, visant à collecter des données et des informations plus significatives et fiables. L'observation directe et l'arpentage, des matériaux, des éléments de construction et l'identification des processus de construction font tous partie des différentes phases d'étude. Le travail de terrain a commencé par la visite du centre historique sélectionné, à savoir *Guemar*, et la réalisation d'une analyse minutieuse et systématique des bâtiments, selon les étapes d'investigation. La première étape est la

reconnaissance et la détection à travers un levé géométrique ; ensuite la définition du processus de construction à travers des entretiens avec des experts locaux et des observations directes sur les chantiers de restauration.

L'étude est menée en particulier sur une dizaine de maisons à cour (Figure 40). Ce travail *in situ*, révèle que certaines sont en bon état et d'autres en état de ruine mais toujours considérées comme représentatives à cause de leurs caractères similaires à la description de la maison type, en plus de leur accessibilité, (Figure 41). L'étude vise à détecter manuellement les dimensions géométriques des maisons (Figure 42.a&b), et faire sortir les dimensions de cellules de base et ses composants, ainsi que les dimensions et caractéristiques de la texture de la maçonnerie. Des relevés par scanner laser ont également été réalisés sur des maisons complètes (Figure 42.c&d), ainsi que des restitutions photogrammétriques ont été élaborées afin de réaliser des sections pour comprendre le détail constructif. Le relevé géométrique fournit une observation détaillée sur les différentes composantes de la maison et les connexions entre elles.

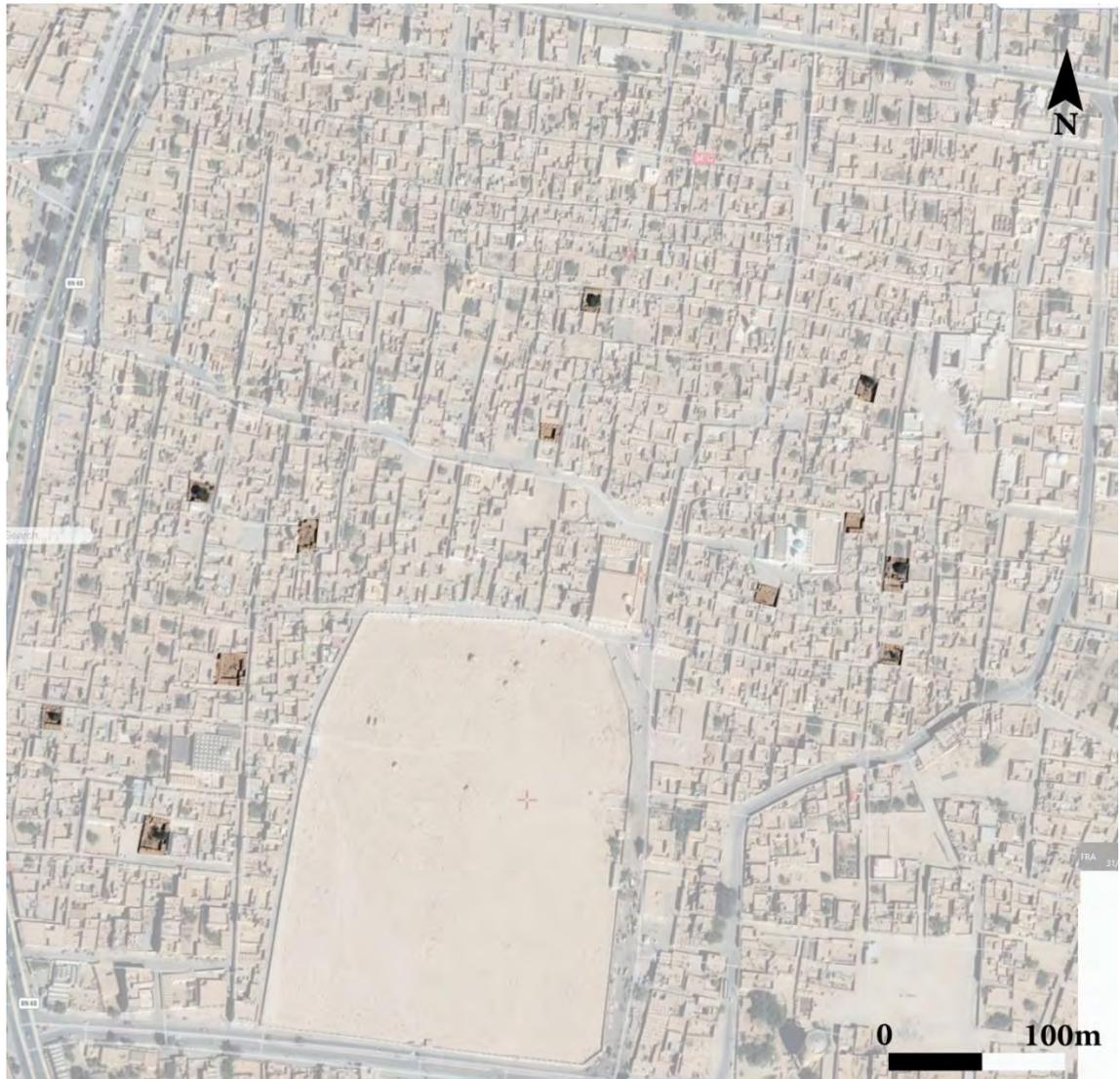


Figure 40. Positionnement des maisons étudiées. (<https://satellites.pro>, consulté le 15/02/2020, traitement : l'auteur).



Figure 41.a. Images des maisons en état de ruines étudiées. B. Maison en bon état étudiée. (l'auteure, 2019).

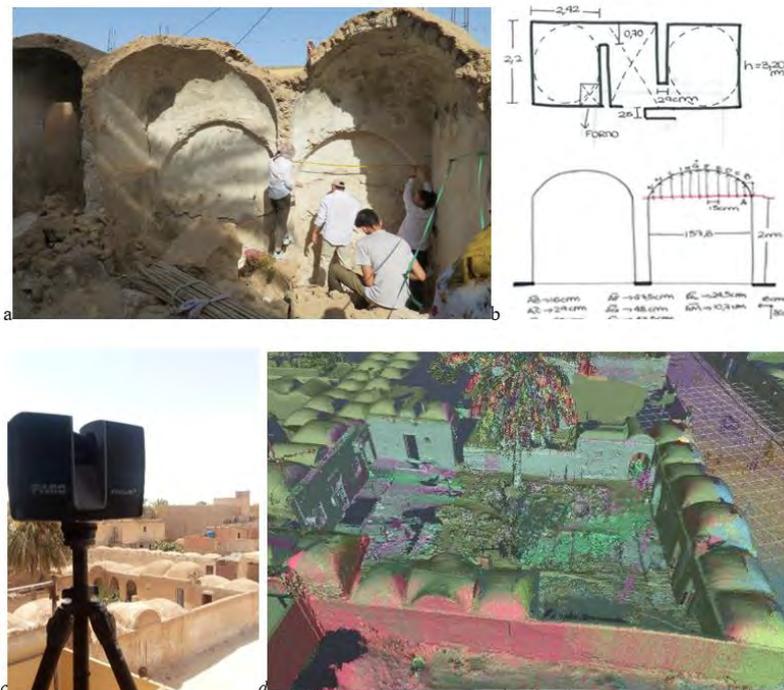
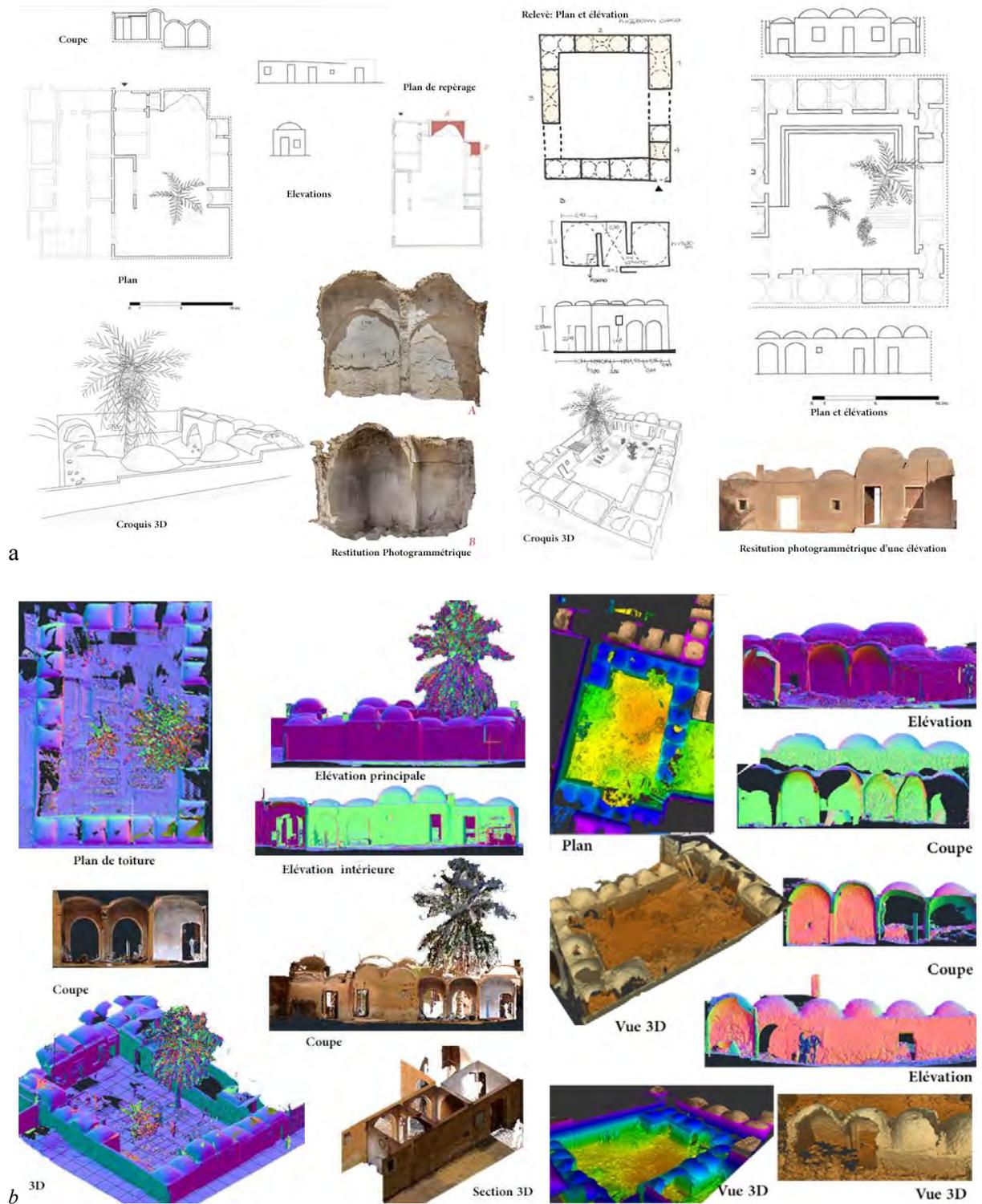


Figure 42. a. Photo prise lors l'opération d'un relevé manuel in situ d'une maison en ruine (l'auteure, 2019). b. Dessin des relevés effectuée in situ. c. Photo prise lors l'opération d'un relevé d'une maison par scanner laser 3D (l'auteure, 2019). d. 3D d'une maison relevé par scanner laser 3D (l'auteure).

Quant à la maison traditionnelle, dans sa forme la plus courante, elle est introvertie, organisée autour d'une cour centrale, qui est définie par la répétition de cellules (unités) de plain-pied similaires recouvertes par des coupole (figure 43). À partir de la cellule de base, qui a une forme approximativement carrée avec des dimensions moyennes de 2,18 x 2.20m² (Tableau 1, Figure 43), ses éléments architecturaux et constructifs ont été classés dans un inventaire en fonction de leur rôle. Ces éléments inventoriés sont les fondations, murs, toitures et système de couverture à l'image des coupoles et voûtes, ouvertures, contreforts, arcs et arcades. Préliminairement, et à partir des relevés effectués et la documentation produite (Figure 43), les dimensions de quinze cellules élémentaires ont été identifiées comme indiqué dans le tableau 1, et en référence à la figure 44, des dimensions avec des valeurs variables ont été rapportées avec les valeurs moyennes. Ces valeurs permettent d'identifier la codification des dimensions des éléments architecturaux et constructifs relevés, et de définir les typologies existantes pour la catégorie de la construction mineure (résidentielle). D'autre part, ces éléments seront comparés avec ceux de l'architecture singulière de la région à savoir les mosquées comme la mosquée *Sidi Massoud* et la *Zaouïa Ettidjania*, où une observation profonde a été faite pendant les travaux de sa restauration.



Cellule à coupole	a (m)	b (m)	h (m)	p (m)	e_m (m)	e_c (m)
1	2.25	2.5	2.32	0.54	0.32	0.16
2	2.3	2.48	2.3	0.56	0.31	0.18
3	2.33	2.03	1.9	0.9	0.25	0.18
4	2.35	2.3	1.9	0.9	0.28	0.18
5	2.35	2.2	1.95	0.83	0.25	0.17
6	2.1	2.37	1.97	0.81	0.26	0.18
7	2.1	2.1	1.87	0.72	0.28	0.18
8	2.1	2.3	1.87	0.7	0.32	0.18
9	2.35	2.4	2.5	0.8	0.25	0.15
10	2.27	2.12	2.32	0.68	0.35	0.2
11	2.4	2.2	2.4	0.6	0.29	0.17
12	1.95	2.05	2.31	0.64	0.29	0.16
13	1.9	1.93	2.5	0.5	0.32	0.15
14	1.97	1.9	1.9	0.85	0.31	0.17
15	1.95	2.13	1.8	0.9	0.25	0.2
Valeur moyenne	2.18	2.20	2.12	0.73	0.28	0.17
Écart-type	0.17	0.18	0.25	0.15	0.03	0.01
Coefficient de variation	0.08	0.08	0.12	0.20	0.11	0.08

Tableau 1. Dimensionnement des cellules à coupoles (l'auteure).

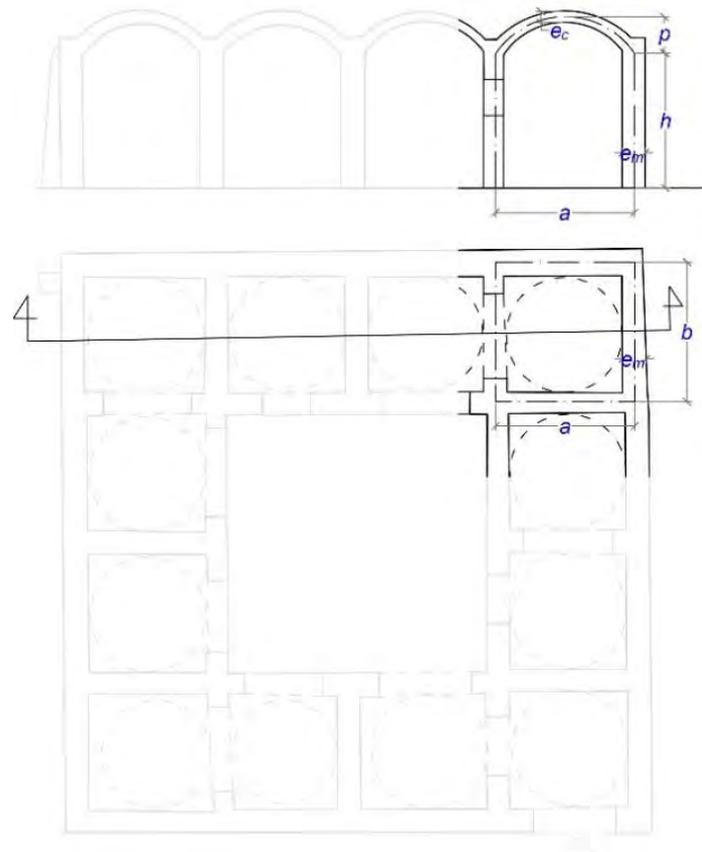


Figure 44. Extrait d'un plan et coupe schématiques d'une maison, une cellule à coupole (l'auteur).

En résumé, l'inventaire des éléments de construction se fait selon un classement en fonction de leurs rôles au sein de la construction, en se basant sur le traitement des données recueillies sur le terrain en fiches descriptives. Les différents ensembles d'éléments de construction ont été identifiés, décrits techniquement avec une représentation graphique en plan et coupe verticale, accompagnée d'une modélisation du processus constructif, en précisant les matériaux, la taille, la disposition, et le détail d'assemblage. En comparant le même élément utilisé pour le bâtiment mineur, autrement dite l'architecture domestique, avec celui d'une construction majeure. L'objectif est de présenter un glossaire d'éléments typiques pour une représentation systématique, à partir de la base de la construction jusqu'au système de couverture.

a) Fondations

Selon la description des anciens maîtres constructeurs, la profondeur des fondations est de 50 à 70 cm, cette valeur varie selon le niveau de la couche du sol stable trouvée après le creusement et l'enlèvement des couches d'excavas. En évitant de grandes profondeurs, on arrive à empêcher le contact avec l'eau phréatique causant la remonté

capillaire et l'humidité, qui engendre la dégradation de la construction (Figure 45.a). La fondation est de type filante et généralement construite avec les grands blocs de la pierre de la *Rose des Sables* (figure 45.b), en l'associant à un mortier composé de trois parts de gypse extrait de la pierre de *Tafza* et deux parts d'eau. La maçonnerie de la fondation peut contenir une ligne ou deux lignes de pierres déposées horizontalement ou le mixte de ces deux derniers, cela dépend la taille de la pierre utilisée, en optant pour un mélange de petites pierres et du mortier pour régulariser et combler les vides entre les grandes pierres qui sont extrêmement irrégulières (Figure 46). Dans certains cas, il est possible de trouver des fondations construites avec la pierre de *Salsala* et le mortier de gypse (Figure 45.a). Les cavités sont remplies de pierres de différentes tailles et du sable, tout en veillant à ce que les interstices entre les plus grosses pierres soient rebouchés avec des pierres plus petites (Figure 46). Selon (Lebsir, 2016), des pierres saillantes s'imbriquent entre deux semelles à jumeler afin d'assurer le changement de direction. La texture des fondations est caractérisée par l'irrégularité. Concernant la finition, l'interface entre la fondation et le sol est protégée de l'eau par une épaisse couche de mortier de gypse, et au final, la fondation arrive à une épaisseur comprise entre 40 et 45 cm (Figure 46).

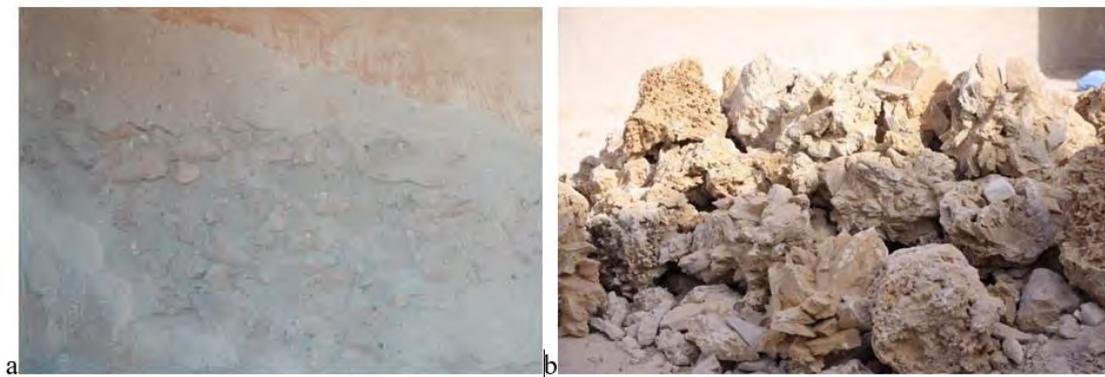


Figure 45.a. Base d'un mur construite avec la pierre de Salsala (l'auteur, 2019). b. Grands blocs de la pierre de la Rose des Sables (l'auteur, 2019).

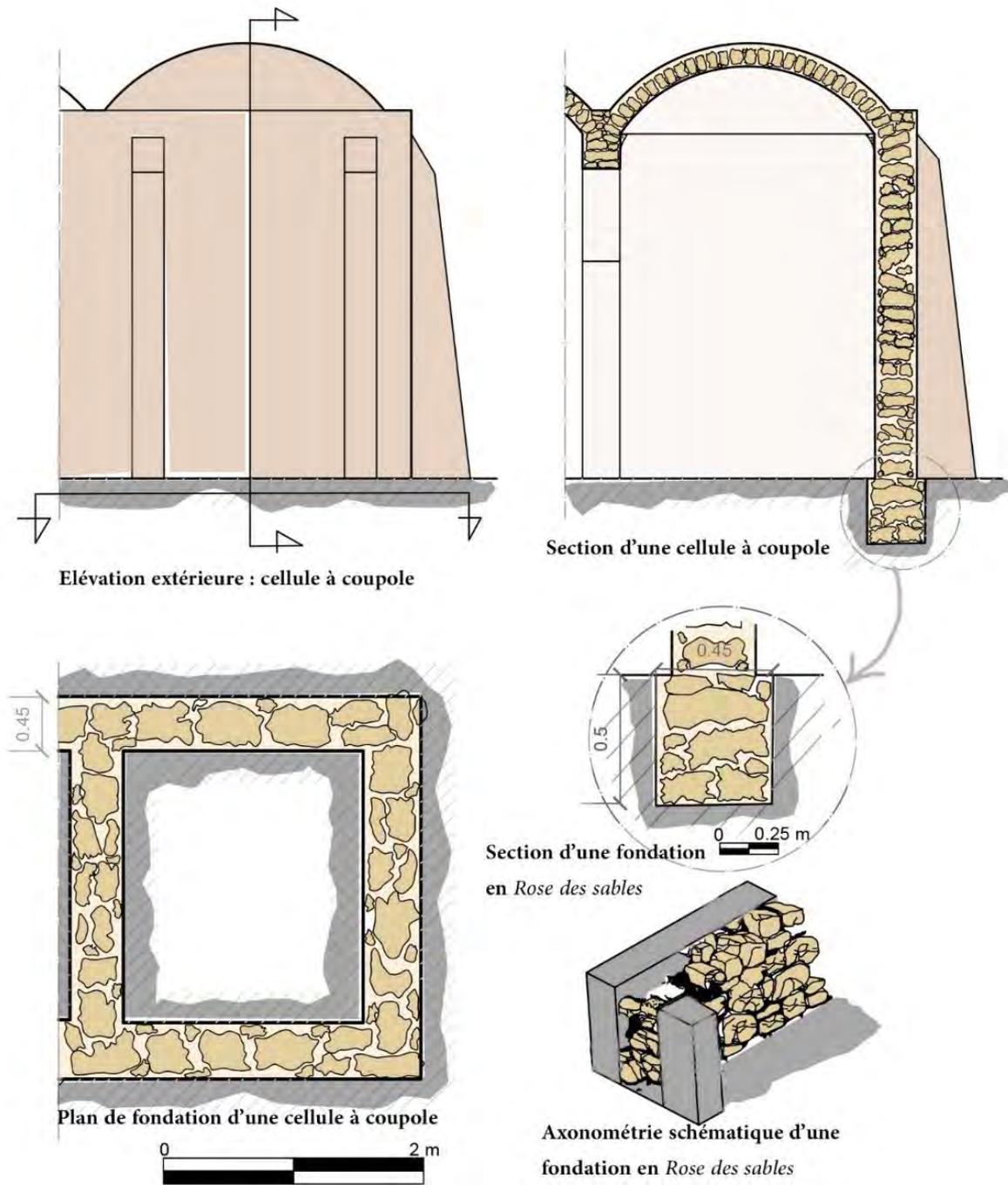


Figure 46. Dessin explicatif de la fondation en Rose des Sables : plan, section et axonométrie (l'auteure).

Tandis que les fondations pour les monuments sont plus larges, mêmes si le processus de construction est similaire de celui des fondations des maisons. Et cela revient à la complexité de la structure de ces monuments où ils ont besoin d'avoir des fondations avec plus de capacité de prendre les charges de la superstructure. La maçonnerie de ces fondations se compose généralement de deux lignes de pierre de la *Rose des Sables* de taille importante, protégé également de l'eau par une couche

considérable de mortier de gypse. Toutes les fondations sont légèrement plus larges par rapport aux murs qu'elles supportent.

b) Eléments verticaux : mur d'élévation et Contrefort

Les murs s'élèvent des fondations avec une épaisseur légèrement plus petite (Figure 47, Section et Axonométrie), avec une disposition inégale en raison de l'irrégularité des blocs, bien qu'une couche importante de gypse soit mise sur la maçonnerie de fondation afin de créer des plans de pose horizontaux. Dans la cellule à coupole, les murs sont construits avec des blocs de pierre de la *Rose des Sables* de différentes dimensions en utilisant le mortier de la même composition de celle des fondations. Par la différence des tailles des pierres, l'épaisseur de la paroi, e_m , varie entre 25 et 35 cm selon le tableau 1. L'épaisseur change relativement selon l'emplacement du mur, interne ou externe, où elle devient plus large, tandis que, la hauteur du mur, h , est entre 1,80 et 2,5 m (tableau 1, Figure 47). La maçonnerie du mur d'élévation peut contenir une ligne ou deux lignes de la pierre de la *Rose des Sables – Louz-*, des pierres déposées plus ou moins horizontalement, stabilisé avec de petites pierres utilisées comme cales, et qui servent également à régulariser et remplir le vide entre les grandes pierres.

Le maître constructeur commence le processus de construction du mur d'élévation par la mise en place d'une couche importante de mortier sur laquelle il place la pierre de la *Rose des Sables* à l'aide d'un fil de ligature, et entre chaque deux pierres il met du mortier avec un volume égal ou un peu plus à celui du bloc de la pierre. Cette quantité de mortier est utilisée à cause de l'irrégularité des blocs, et elle permet de remplir le maximum de vide. En effet, la maçonnerie du mur d'élévation se compose d'un pourcentage de mortier plus ou moins égal à celui de la pierre. Selon le maître constructeur, la réalisation des murs se fait avec une attention particulière à la connexion entre deux murs convergés, de façon à assurer une liaison par un appareillage croisé à l'angle, permettant un bon jointoiement. En addition il laisse la pierre en saillie au niveau du croisement, quoique la forme irrégulière de la pierre rend la réalisation de cette disposition d'appareillage difficile (Figure 47, plan et image 3). Ces saillies sont présentées dans certains cas par des contreforts.

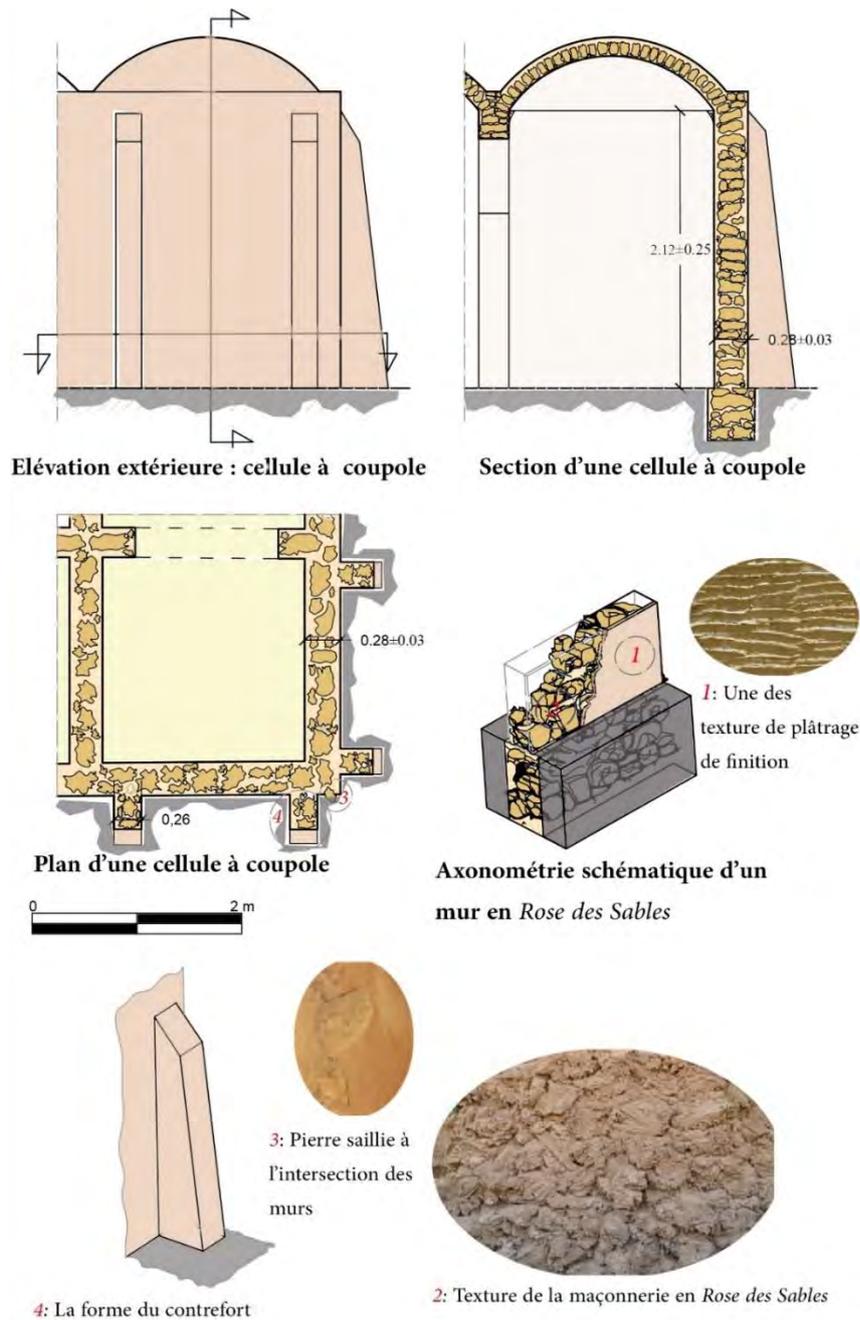


Figure 47. Dessin explicatif du mur et contrefort en Rose des Sables : plan, section et axonométrie (l'auteur).

Les contreforts², localement appelés *Laaraguib*, sont des appuis de maçonnerie, en *Rose des Sables* et de gypse, saillant sur l'élévation extérieure du mur donnant sur la cour centrale et également à l'extérieur de la maison. Ils ont une forme trapézoïdale dotée d'une base large et un haut moins large, et parfois inclinée (Figure 47), avec une moyenne d'épaisseur plus au moins égale à celle du mur. Ils permettent de reprendre en partie les effets de la charge et buter les poussées latérales des arcades et des

² Le nom local des contreforts *Laaraguib* pluriel de *Argoub*

coupoles. Ils sont fréquemment utilisés dans les maisons rurales (Figure 2.22), en raison de leur répartition dispersée où ils ne disposent pas d'unité voisine permettant de contrer les poussées. En ville, la densité urbaine est élevée et les murs de mitoyenneté entre deux maisons sont fréquents, et les murs verticaux de la maison voisine jouant le rôle de contreforts (figure 2.23). Dans ce cas, les contreforts sont très limités, en particulier dans certains murs extérieurs donnant sur les ruelles, et dans les murs intérieurs donnant sur la cour centrale (figure 2.24).

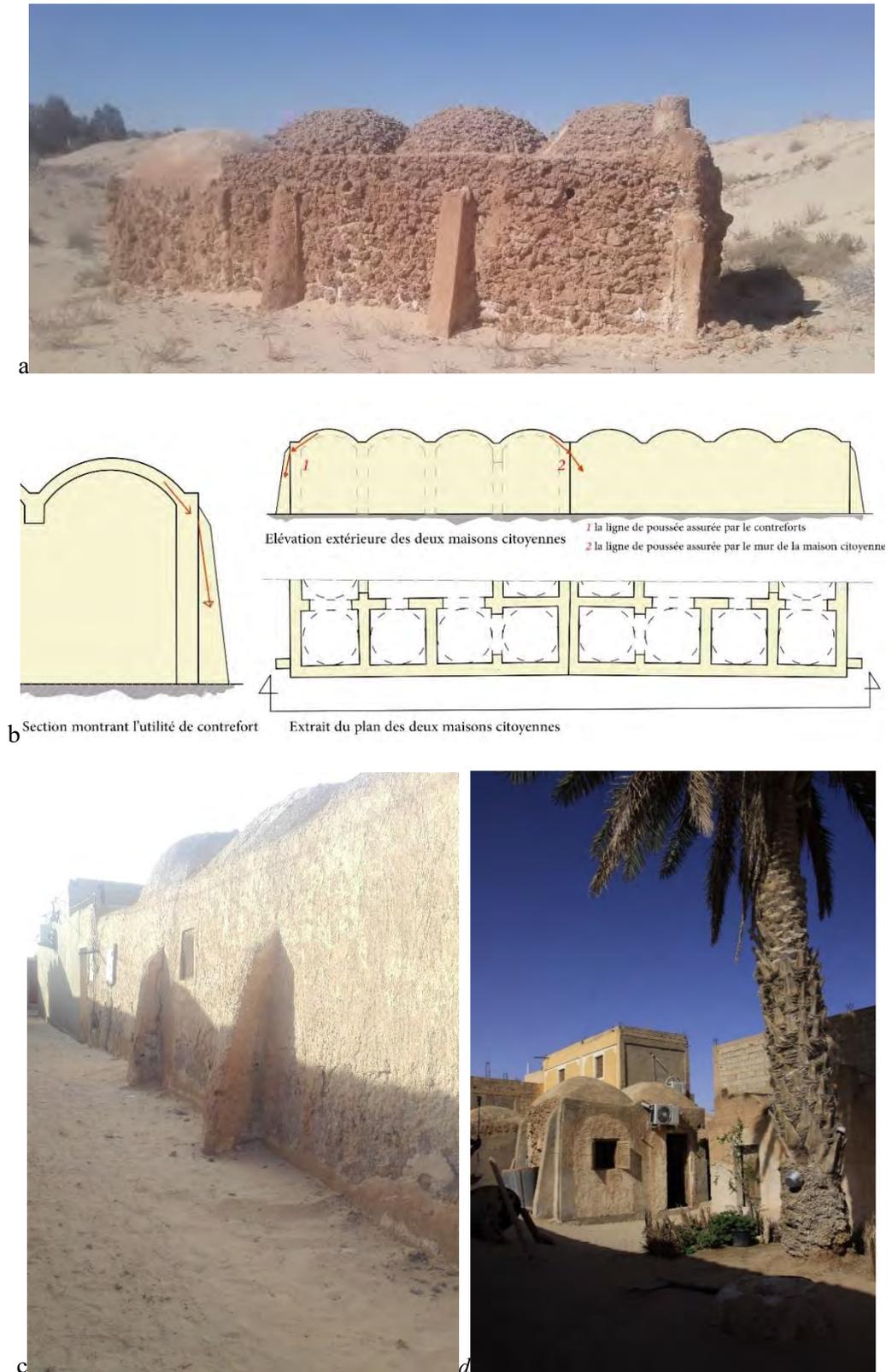


Figure 48. a. Maison rurale avec des contreforts, Oued Souf (l'auteure, 2018). b. Fonctionnement de contreforts, Rôle de mur de la maison citoyenne (l'auteure). c. Contreforts donnant sur la ruelle. d. Contreforts donnant sur la cour centrale (l'auteure, 2019)

A la fin, les murs sont caractérisés par une texture irrégulière (Figure 49.a), et sont généralement protégés par une couche de plâtre à base d'une poudre de gypse fine (Figure 49.b), un résultat de tamisage du gypse produit de *Tafza* afin d'éliminer les gros morceaux de cendre de bois et les gros gravats de pierre non détruits (Figure 38.d). L'épaisseur du plâtrage de gypse pour les murs intérieurs varie en fonction de la quantité nécessaire pour lisser la surface. Généralement, la couche de plâtre utilisée pour les murs extérieurs est plus importante, elle peut aller de 5 à 10 cm, une épaisseur nécessaire pour protéger la maçonnerie des agressions externes comme l'humidité et l'érosion causée par les tempêtes de sables (Figure 47). La finition se caractérise par une texture composée de lignes obtenues par l'usage des doigts (Figure 47&49.b).



Figure 49. Texture irrégulière d'un mur en blocs de *Rose des Sables* (l'auteure, 2018). b. Mur en *rose des sables*, partie inférieure avec une finition de plâtre. (l'auteure, 2019).

D'autre part, les murs des mosquées portant des coupoles de grandes dimensions ou dans la *Zaouia Ettidjania*, sont plus épais comparativement à celle des cellules de l'habitation. Dans certains cas, leur épaisseur peut atteindre approximativement à 80 cm, et généralement se compose de deux lignes de pierres de la *Rose des Sables* de grandes tailles, d'environ 60 cm de longueur, réalisées avec le même procédé utilisé pour les murs des cellules (Figure 50.a). En outre des murs, des piliers de forme croisée ou des colonnes sont utilisés dans les salles hypostyles, construites avec les mêmes matériaux et le même processus (Figure 50.c, d & e). On retrouve aussi, les contreforts qui jouent un rôle indispensable dans les édifices monumentaux. Ils sont de taille importante vu la charge de la poussée engendrée par les éléments de grandes dimensions qui assurent le recouvrement de ces édifices monumentaux (Figure 50.b). Par ailleurs, la même couche de finition en plâtre est gardée.



Figure 50. a. Mur de la Zaouia Ettidjania lors la reconstruction, avec des grands blocs de la pierre de la Rose des Sables (l'auteure, 2018). b. Contreforts dans la façade externe de la Zaouia Ettidjania (l'auteure, 2019). c. Pilier croisé en Rose des Sables, Zaouïa Ettidjania, Guemar. d. Pilier octogonal en Rose des Sables, Zaouïa Ettidjania, Guemar. e. Colonne en Rose des Sables, Zaouïa Ettidjania, (l'auteure, 2019).

En bref, la maçonnerie du mur d'élévation représente à la fin un conglomérat composée de pierre de la *Rose des Sables* et de mortier de volumes proportionnés de manière équivalente, c'est-à-dire la moitié de la maçonnerie est faite de pierre et l'autre moitié est de mortier de gypse (Figure 51). Ces murs représentent la structure verticale de la construction, d'où vient leur rôle de murs porteurs. Les murs d'élévations externes sont dotés de contreforts aux angles et sont presque aveugles, alors que les murs internes contiennent des ouvertures à savoir portes et fenêtres de petites dimensions donnant sur la cour centrale, et l'arc reliant deux cellules.

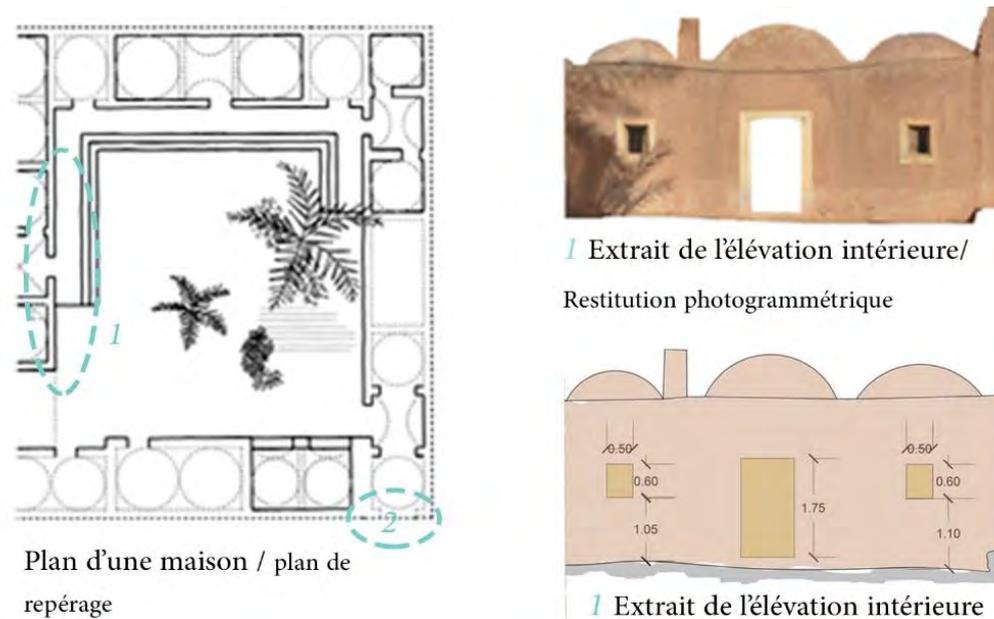


Figure 51. Maçonnerie d'un mur en Rose des Sables et mortier de gypse : a. avant la reprise du mortier ; b. après la reprise du mortier (l'auteure, 2019).

c) Ouvertures et arcs

A l'extérieur, se trouve une seule ouverture, c'est celle de la porte d'entrée. Les ouvertures donnant sur la cour centrale sont les portes des pièces, les fenêtres et les arcades des galeries³. Les portes ont des formes rectangulaires avec des dimensions, 0.80 à 0.85 m de largeur, et la hauteur est généralement 1.70 m mais elle peut y arriver jusqu'à 2 m. Les fenêtres ont des formes plus ou moins carrées avec des dimensions moyennes de 0.60 m (Figure 52). Ces ouvertures nécessitent l'utilisation d'un morceau du bois constitué en la moitié d'un tronçon de palmier, comme un linteau (Figure 52). Ce morceau de bois joue un rôle essentiel dans la transmission des charges vers le mur porteur de la construction. Le linteau est le seul dispositif dans la maison où la matière du bois est utilisée. Par ailleurs, des fenêtres plus grandes sont introduites par certains habitants lors du réaménagement et la réhabilitation de leurs maisons.

³ L'appellation locale de la galerie est *Sabat*



2 Porte d'entrée à la maison



Porte d'une cellule à coupole



Linteau d'une porte, en bois du palmier

Figure 52. Dessins et photos explicatifs des ouvertures, portes et fenêtres, de la maison Soufi : plan, élévation, restitution photogrammétrique et images (l'auteure).

On outre, les autres ouvertures où l'arc est utilisé sont les arcades de la galerie externe ou dans l'arcade qui s'ajoute entre deux unités simples, permettant de joindre des volumes et d'élargir l'espace. Certaines portes utilisent aussi un arc plein cintre surbaissé (Figure 53). Les arcs sont en plein cintre et plein cintre surbaissé (Figure 53), construits sans cintrage et en utilisant des blocs de *Rose des Sables* placés avec une organisation à peu près radiale et du mortier de gypse. Ils reposent sur les murs latéraux ou sur un pilier intermédiaire supportant un côté de l'arcade (Figure 53) et leur épaisseur dépend de l'épaisseur du mur. Dans les maisons hybrides, qui ont subi des modifications lors de leur réhabilitation, entre autres, l'arc au niveau de l'arcade reliant deux unités est remplacé par une poutre métallique, une transformation justifiée par l'échec structurel apparu au niveau de la clé de l'arc (Figure 54).

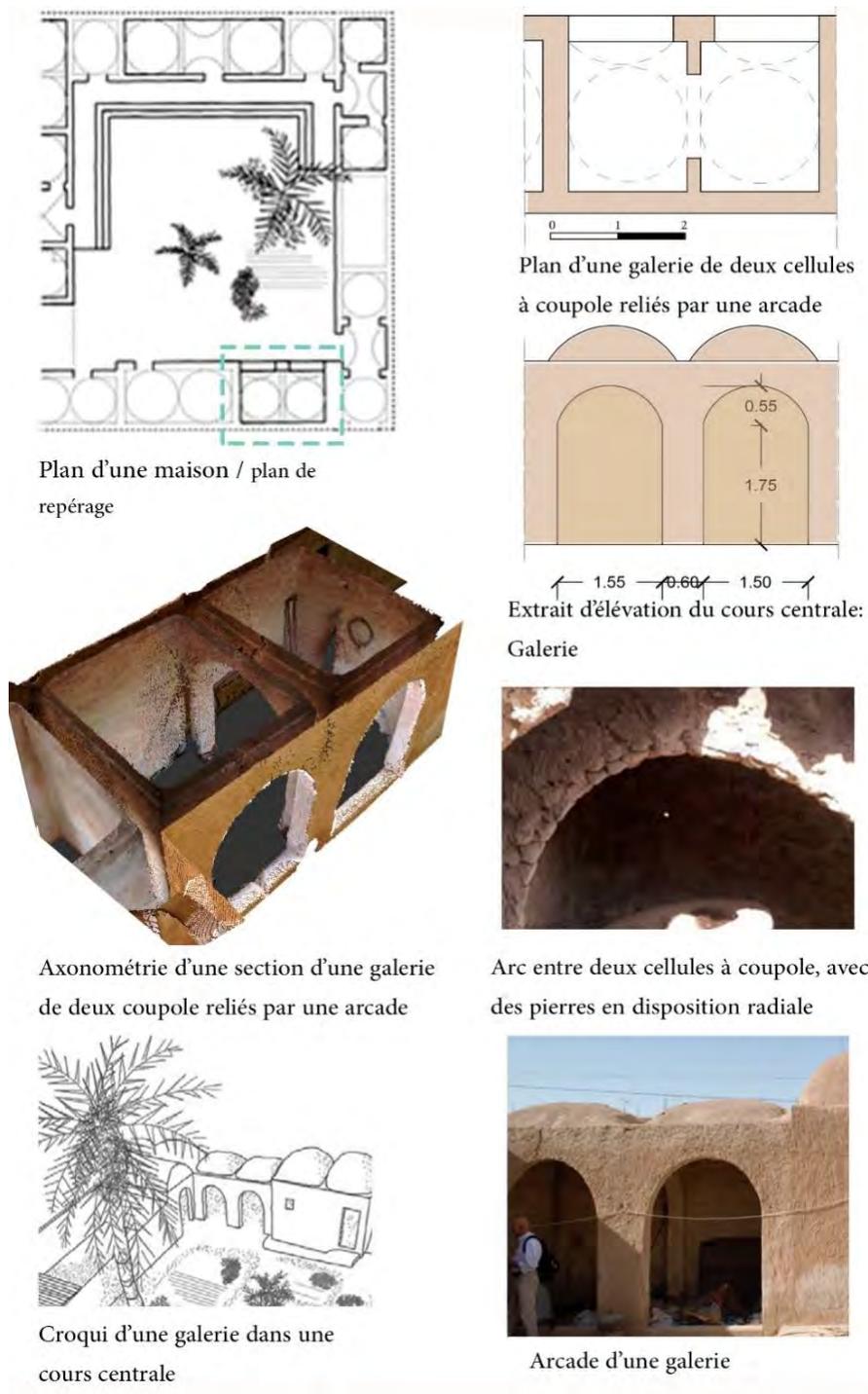


Figure 53. Dessins et photos explicatifs des arcades de la maison Soufi : plan, élévation, 3D et images (l'auteure).



Figure 54. Poutre métallique à la place d'un arc : a. vue intérieure ; b. Vue extérieure (l'auteure : 2019).

D'autre part, se trouvent les mêmes ouvertures dans les édifices religieux, dont les arcades sont les plus utilisées. Les dimensions de ces ouvertures sont relativement plus grandes que les ouvertures des maisons. Ces dimensions sont proportionnées par rapport à l'échelle de la construction. Les arcades ont, en outre, un tracé d'un arc plein cintre comme celle des maisons, mais également d'autres avec un tracé d'un arc brisé (Figure 55). Les procédés de la construction sont aussi similaires à ceux utilisés dans la construction de la maison, sauf dans certaines arcades de grandes dimensions, qui nécessitent l'utilisation d'un coffrage en bois de palmier. Dans certains cas, les arcades sont utilisées pour transmettre la charge des coupes et des voûtes.



Figure 55. a. Arc brisé, arcades de la salle hypostyle de la mosquée, Zaouïa Ettidjania (l'auteur, 2019). b. Arc surbaissé, Zaouïa Ettidjania (Giovanni Gubitosa, 2019). c. Arcades en anse de panier (Sofia Nembrini, 2019). d. Différents types d'arcades, galerie Zaouïa Ettidjania (l'auteur, 2019). e. Arcades brisés, façade restituée de la Zaouïa Ettidjania (Islem Dali).

d) Systèmes de couverture

Le système de couverture dans la région du *Souf* est important à cause de sa particularité, qui revient à l'utilisation des coupôles pour toute construction, ce qui a qualifié la région par la ville de mille coupôles et coupole. Bien que la coupole soit l'élément le plus dominant dès la fondation des centres historiques, d'autres éléments se sont introduits plus tard, tels que les voûtes. Ainsi, il est important de définir les systèmes de couverture de la ville pour l'élaboration d'une classification typologique, en se basant sur plusieurs critères à savoir le critère formel architectural et le critère constructif. D'une part, le critère formel architectural se base sur différents paramètres : à titre d'exemple la forme géométrique de la coupole consiste en les aspects formels de sa base et de son profil, définis par ses dimensions, sa hauteur et les proportions entre les deux, autrement dit, les rapports dimensionnels. D'autre part, le critère constructif consiste en la technique de construction, les éléments structuraux et les matériaux utilisés pour la définition du processus de construction. A la fin, la relation entre le

caractère formel et l'aspect constructif de la coupole sont mis en évidence pour une classification typologique qui sert à comprendre le système structurel et son fonctionnement.

Après l'identification des types de système de couverture du paysage urbain du *Souf*, des typologies et sous typologies ont été identifiées dans chaque type, en se basant sur les critères de classification, soit dans le tissu traditionnel ou colonial, et dans les édifices résidentiels ou singuliers. Au premier lieu, les coupoles sont les éléments les plus répandus dans la région et qui donnent un aspect particulier à ce paysage, dont les coupoles des habitations qui se trouvent dans le tissu traditionnel sont les plus dominantes, par ailleurs, se trouvent aussi certaines coupoles dans le tissu coloniales, et des coupoles de typologies différentes et de tailles importantes pour les édifices singuliers (Figure 56). L'autre élément de couverture utilisé est celui de la voûte qui se retrouve dans les maisons coloniales, mais également dans le tissu traditionnel soit dans les habitations ou les édifices singuliers (Figure 56). Le nombre des voûtes est relativement bas au nombre des coupoles. De plus des terrasses arrondies, le seul système de plancher plat dans l'ancienne cité de *Guemar* se trouve dans la *Zaouïa Ettidjania* (Figure 56).



Coupole, maison, tissu traditionnel



Coupole, maison, tissu colonial



Coupole, édifice singulier, Zaouia



Coupole, édifice singulier, mosquée



Voûte en berceau, maison, tissu traditionnel



Voûte croisée, maison, tissu traditionnel



Pyramide, édifice singulier, Zaouia



Pancher plat, édifice singulier, Zaouia

Figure 56. Système de couverture utilisé dans la région du Souf (l'auteure).

1. Coupoles et leurs typologies

Le répertoire des structures des coupoles en *Rose des Sables* est basé sur un modèle de construction unique, à savoir la coupole construite avec la *Rose des Sables* et le mortier de gypse sans coffrage, autrement dit, autoportante. Il convient de noter que la typologie constructive adoptée est profondément liée aux ressources et matériaux disponibles sur le site et que le modèle de la typologie original est adapté pour répondre à des besoins spécifiques de la fonction du bâti. En suivant les critères de classifications des coupoles en *Rose des Sables* à savoir le critère architectural et le critère constructif, deux typologies des coupoles ont été identifiées dans les édifices à caractère résidentiel : d'une part, la typologie coloniale présente dans le tissu colonial avec un nombre modeste ; d'autre part, la typologie des coupoles traditionnelles, qui est la plus dominante.

▪ *Coupoles traditionnelles*

La typologie des coupoles traditionnelles est celle qui se présente dans le tissu traditionnel au cœur ou près des centres urbains historiques. Bien qu'il semble que toutes les coupoles traditionnelles pour les habitations sont similaires, cette typologie se manifeste en deux sous typologies, à cause des variations de l'un des critères de classification formelle. Cependant, les autres caractéristiques de ces deux sous typologies sont similaires selon les critères de classification (critère architectural et constructif).

La typologie traditionnelle (y compris le deux sous typologies) se caractérise par son caractère autoportant réalisé sans coffrage due à la rapidité de prise du mortier de gypse qui facilite le travail du maître constructeur. Le processus de réalisation commence par une base carrée qui couvre le périmètre des murs de la cellule, en passant à la réalisation des couches horizontales successives en *Rose des Sables* et de mortier de gypse, celles-ci se transforment progressivement d'une forme carrée à une forme circulaire. En conséquent, la coupole se compose de deux parties, une partie inférieure qui a des couches horizontales de forme approximativement carrée, ressemblant à la voûte en arc-de-cloître, dont les arrêtes sont très fines, et, une partie supérieure, qui a des couches horizontales de profil circulaire, présentant une forme d'une coupole de révolution. La partie inférieure de la coupole semble être un élément de transition, autrement dit, des trompes (Figure 57).

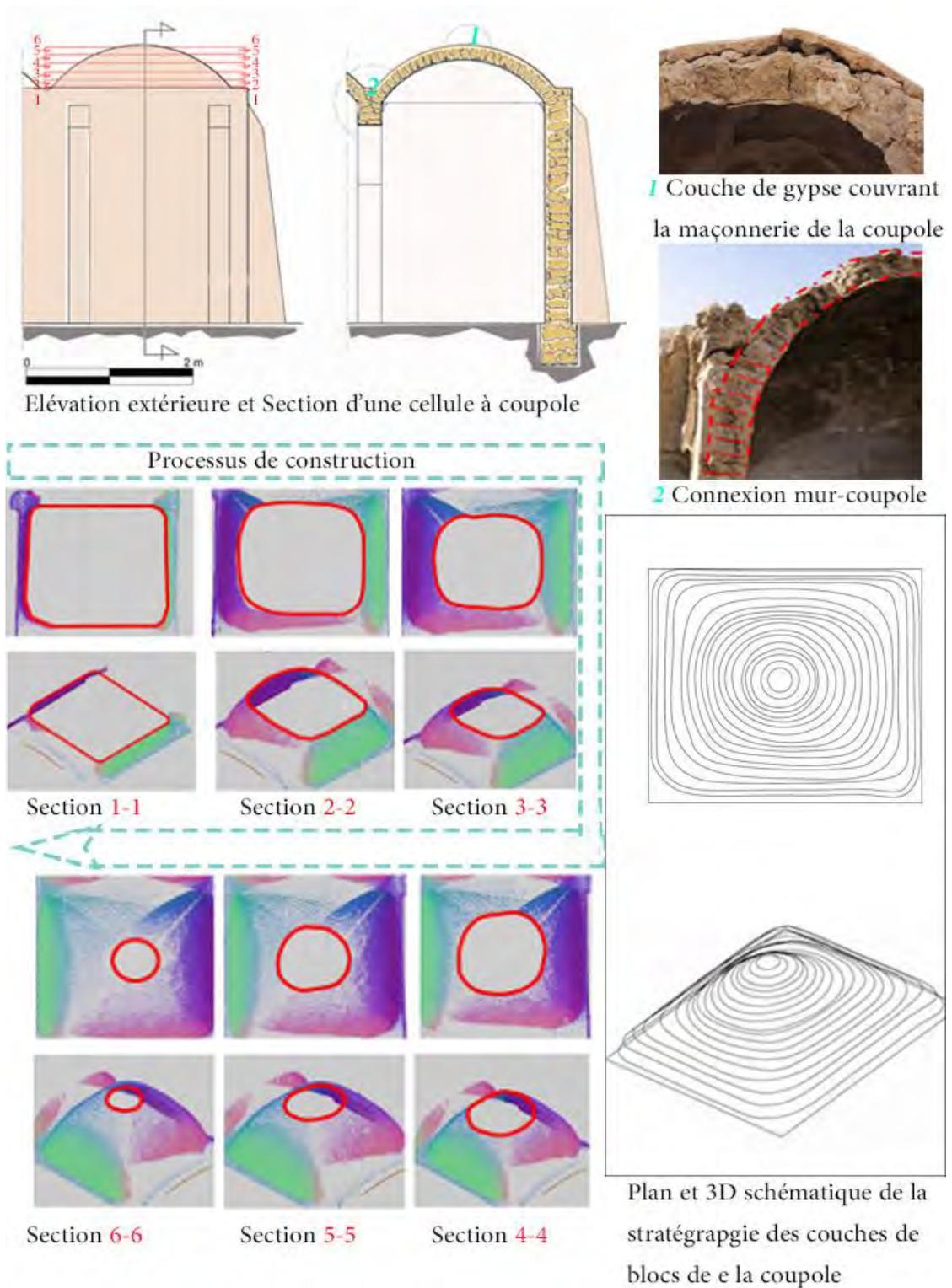


Figure 57. Dessin explicatif de la coupole traditionnelle en Rose des Sables (l'auteure).

Il important de noter que l'utilisation du modèle HBIM a permis la reconstruction précise de la géométrie et des techniques de construction de cette typologie comme c'est le cas dans d'autres cas similaires (Brumana et al., 2018; Teza & Pesci, 2013).

Notamment, la méthodologie utilisée pour le modèle HBIM des voûtes du palais Magio Grasselli à Crémone a montré la manière de transformer la typologie des voûtes en arc-de-cloître en une construction de dôme dans la même voûte (Brumana et al., 2018). C'est grâce au processus de construction générative utilisé pour la voûte en arc-de-cloître, et le transformant en dôme dans la partie supérieure, redonnant une sorte de morphing, fusionnant les deux règles génératives différentes, dôme et voûte (Brumana et al., 2018). Ainsi, la morphologie de la typologie de voûte dôme du palais Magio Grasselli présente des similitudes avec celle de la coupole en *Rose des Sables*.

Comme déjà mentionné, dans cette typologie, certains paramètres du critère formel varient d'une coupole à une autre. Cette variation se voit à travers le changement proportionnel observé sur les valeurs des hauteurs de chacun des coupoles, ce qui influence la forme du profil de la coupole. Comme il est indiqué dans le tableau 1 et bien souligné dans le tableau 2.1, les dimensions de la base des coupoles sont proches par le fait que le coefficient de variation est de 0.08 et avec une valeur moyenne de 2.18 mètres, tandis que la hauteur des coupoles a une grande différence dû au coefficient de variation qui est de 0.20. De l'analyse de ces valeurs, il est nécessaire de distinguer deux catégories, en scindant le tableau 2.1 en deux tableaux à savoir le tableau 2.a et 2.b de manière à avoir un coefficient de variation bas. Cela permet de définir deux sous typologies dans la coupole traditionnelle en *Rose des Sables* : la première sous typologie (Tableau 2.a), ayant la variation la plus dominante, elle se caractérise par un profil d'un arc surbaissé (Figure 58) avec une hauteur qui varie entre 0.5 et 0.72 mètres, la deuxième variation se caractérise par un profil avec un arc surhaussé elliptique d'une hauteur variante entre 0.8 et 0.9 mètres. Le profil de cet arc est plus haut que le premier, cela est due à la transition rapide dans les couches horizontales de la forme carrée à la forme circulaire lors du processus de construction. Dès lors, la différence entre les deux variantes représente le pourcentage de l'écart de valeur entre la partie inférieure de la coupole de forme carrée, et la partie supérieure, qu'est de forme circulaire. De ce fait, la hauteur moyenne de la première variation est de 0.62 mètres (tableau 2.a), et la seconde variation est de 0.85 mètres (tableau 2.b), elle est aplatie par rapport à la première, ainsi, se trouve le nombre des profils à section carrée plus important dans la première variation que dans la deuxième (Figure 58). Les coupoles sont protégées par une épaisse couche de mortier de gypse à l'extérieur, qui est d'environ 0.05 mètres

(Figure 57), alors que l'épaisseur moyenne de la coupole est de 0.17 mètres (tableau 2.1)

1

cellule à coupole	a (m)	b (m)	h (m)	p (m)	e _m (m)	e _c (m)
1	2.25	2.5	2.32	0.54	0.32	0.16
2	2.3	2.48	2.3	0.56	0.31	0.18
3	2.33	2.03	1.9	0.9	0.25	0.18
4	2.35	2.3	1.9	0.9	0.28	0.18
5	2.35	2.2	1.95	0.83	0.25	0.17
6	2.1	2.37	1.97	0.81	0.26	0.18
7	2.1	2.1	1.87	0.72	0.28	0.18
8	2.1	2.3	1.87	0.7	0.32	0.18
9	2.35	2.4	2.5	0.8	0.25	0.15
10	2.27	2.12	2.32	0.68	0.35	0.2
11	2.4	2.2	2.4	0.6	0.29	0.17
12	1.95	2.05	2.31	0.64	0.29	0.16
13	1.9	1.93	2.5	0.5	0.32	0.15
14	1.97	1.9	1.9	0.85	0.31	0.17
15	1.95	2.13	1.8	0.9	0.25	0.2
Valeur moyenne	2.18	2.20	2.12	0.73	0.28	0.17
Écart-type	0.17	0.18	0.25	0.15	0.03	0.01
Coefficient de variation	0.08	0.08	0.12	0.20	0.11	0.08

a

cellule à coupole	a (m)	b (m)	h (m)	p (m)	e _m (m)	e _c (m)
1	2.25	2.5	2.32	0.54	0.32	0.16
2	2.3	2.48	2.3	0.56	0.31	0.18
7	2.1	2.1	1.87	0.72	0.28	0.18
8	2.1	2.3	1.87	0.7	0.32	0.18
10	2.27	2.12	2.32	0.68	0.35	0.2
11	2.4	2.2	2.4	0.6	0.29	0.17
12	1.95	2.05	2.31	0.64	0.29	0.16
13	1.9	1.93	2.5	0.5	0.32	0.15
Valeur moyenne	2.18	2.20	2.12	0.62	0.28	0.17
Écart-type	0.17	0.18	0.25	0.08	0.03	0.01
Coefficient de variation	0.08	0.08	0.12	0.12	0.11	0.08

b

cellule à coupole	a (m)	b (m)	h (m)	p (m)	e _m (m)	e _c (m)
3	2.33	2.03	1.9	0.9	0.25	0.18
4	2.35	2.3	1.9	0.9	0.28	0.18
5	2.35	2.2	1.95	0.83	0.25	0.17
6	2.1	2.37	1.97	0.81	0.26	0.18
9	2.35	2.4	2.5	0.8	0.25	0.15
14	1.97	1.9	1.9	0.85	0.31	0.17
15	1.95	2.13	1.8	0.9	0.25	0.2
Valeur moyenne	2.18	2.20	2.12	0.85	0.28	0.17
Écart-type	0.17	0.18	0.25	0.04	0.03	0.01
Coefficient de variation	0.08	0.08	0.12	0.12	0.11	0.08

Tableau 2.1. Dimensionnement des cellules à coupoles, montrant la variation dans la hauteur des coupes, selon cette variation le tableau a été divisé en deux tableaux (tableau a et b). a. Dimensionnement des cellules à coupoles de la première sous typologie. b. dimensionnement des cellules à coupoles de la deuxième sous typologie (l'auteure).

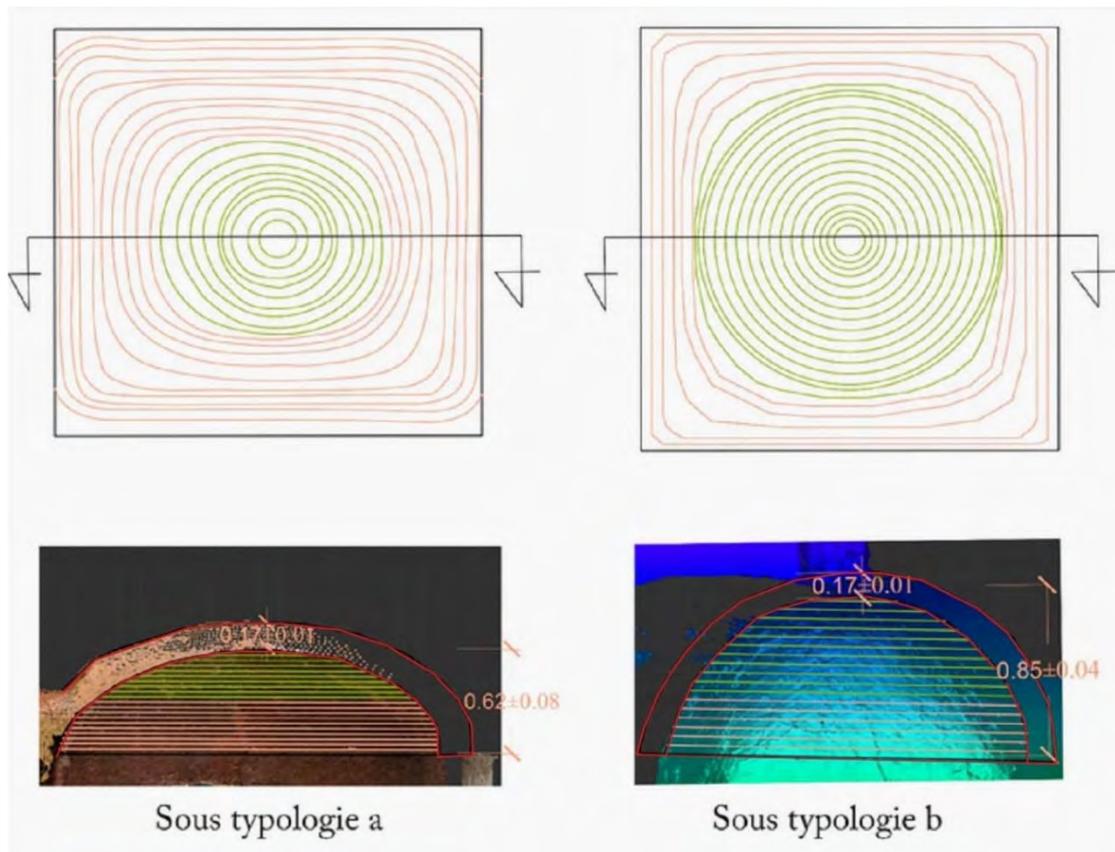


Figure 58. Dessin explicatif des sous typologies de la coupole traditionnelle en Rose des Sables (l'auteure).

D'autre part, certaines coupoles ont été reconstruites pendant les modifications apportées aux maisons lors leur réparation. De ce fait, cette variation figure dans les maisons hybrides, celle-ci ressemble à la première variation, dont les dimensions sont plus grandes. De plus, elle est identifiable par la présence d'une ou plusieurs poutres métalliques introduites lors de l'opération de réhabilitation (Figure 54.b).

- *Coupoles du tissu coloniales*

L'administration coloniale a préservé le même style architectural de la région par la mise en place de lois qui exigeant l'utilisation des coupoles et des matériaux locaux (Ferry, 1951). En effet, les extensions coloniales ont un caractère architectural intégré avec le bâti existant, assuré par la continuité de l'utilisation des matériaux locaux et des coupoles. Ces dernières prennent des formes différentes à celles qui sont traditionnelles, malgré l'utilisation des mêmes matériaux. La coupole du tissu coloniale se caractérise par une forme demi-sphérique réalisée sans coffrage, à l'aide des assises successives, ou le maçon utilise une ficelle d'un demi-diamètre de long à l'extrémité d'un poteau qui marque le centre de la coupole pour définir la position des moellons de la *Rose des*

Sables (Figure 59). Le diamètre peut arriver à 3 mètres, et son épaisseur est de 15 centimètres approximativement (Mangin & Panerai, 1978).

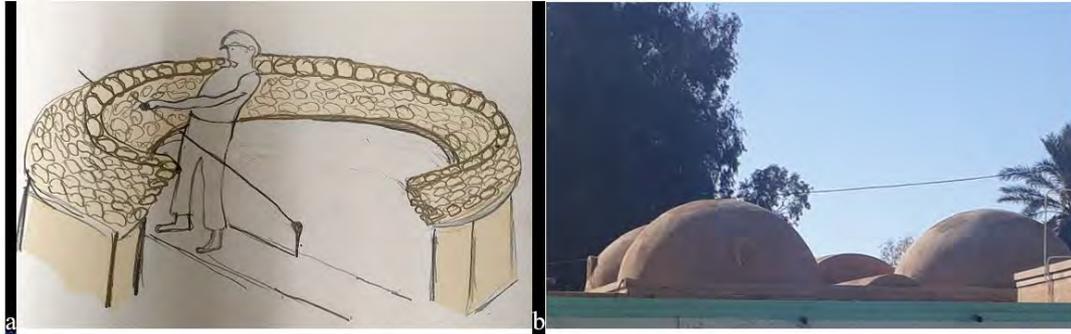


Figure 59. a. Processus de construction de la coupole coloniale. b. Coupoles coloniales, Guemar (l'auteur, 2018).

- *Coupoles pour les mosquées*

Les coupoles jouent un rôle spirituel dans les édifices religieux, ceux-ci se caractérisent par une diversité des typologies des coupoles et de dimensions importantes relativement à celles qu'on retrouve dans les constructions résidentielles. Ces coupoles couvrent des espaces principales par exemple la salle de prière des mosquées. Le plus répandu dans ces édifices c'est la coupole octogonale avec un tambour également de forme octogonale, reposant sur quatre trompes aux angles, qui servent à transmettre la charge de la coupole et le tambour aux murs (Figure 60). Selon l'entrevue avec le maître du chantier, ces coupoles sont construites avec les matériaux locaux de la région (la *Rose des Sables* et le gypse) sans coffrage, et elles sont plus épaisses par rapport aux coupoles des habitations, leur épaisseur est de 25 centimètres approximativement, et leur diamètre peut atteindre 6 mètres. Une couche épaisse de mortier de gypse sert à protéger la coupole des aléas climatiques. Cette typologie de coupole figure dans la première mosquée de *Guemar* « *Sidi Messoud* » fondé en 1597, et dans la mosquée de la *Zaouïa Ettidjanja*.

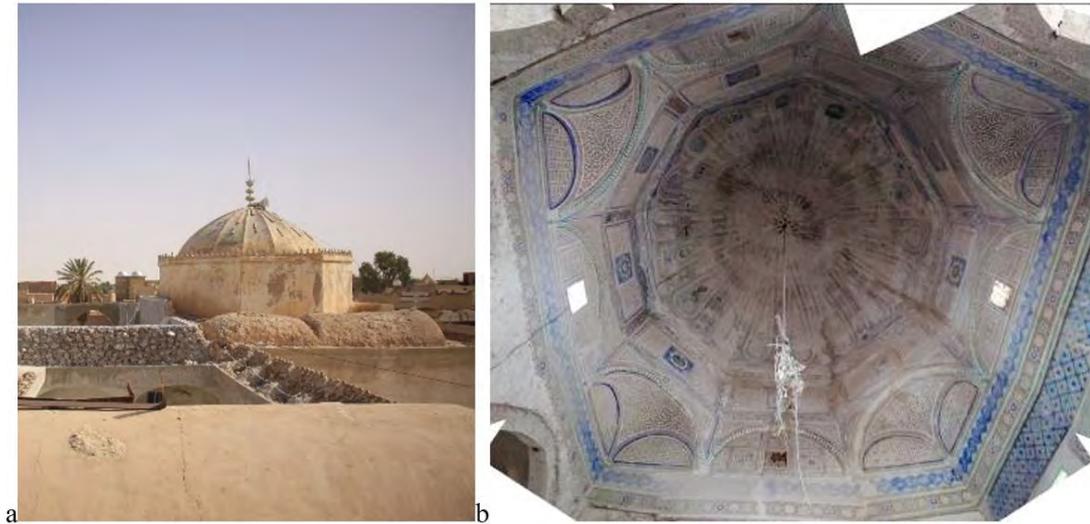


Figure 60. Coupole octogonale : a. Vue extérieur sur la coupole ; b. Restitution panoramique du dôme de l'école religieuse Zaouia Ettidjania (l'auteur, 2019).

En deuxième lieu, les coupoles demi sphérique sont aussi présentes dans les édifices singuliers, ce sont des dômes engendrés par le mouvement de révolution d'un demi-cercle autour de l'axe central du dôme. Comme toute autre construction de la région, elles sont construites avec les matériaux locaux et avec la même technique sans coffrage. Elle repose aussi sur des trompes situées aux angles et qui permettent la transmission des charges de la coupole aux murs (Figure 61.b). Leur diamètre varie entre 4 et 5 mètres avec une épaisseur de 20 à 25 centimètres, et leur hauteur est de 2,5 à 3 mètres. La coupole est protégée par une strate épaisse de mortier de gypse. Cette typologie apparaît dans certaines mosquées et dans la *Zaouia Ettidjania*. Ces deux typologies de coupoles sont connues par leur importance due au symbolisme spirituel qu'elles portent. De ce fait, une décoration intérieure couvre la surface de la coupole, représentée par une ornementation en sculpture sur plâtre avec des formes géométriques et florales différentes et colorées, accompagnées des pièces en céramique, mais également avec des dessins de peintures (Figure 61.c). Dans ces édifices singuliers, ces coupoles sont entourées par d'autres coupoles de petite taille, et qui ont la même typologie que celles qui se trouvent dans les constructions résidentielles de la région (Figure 60.a).

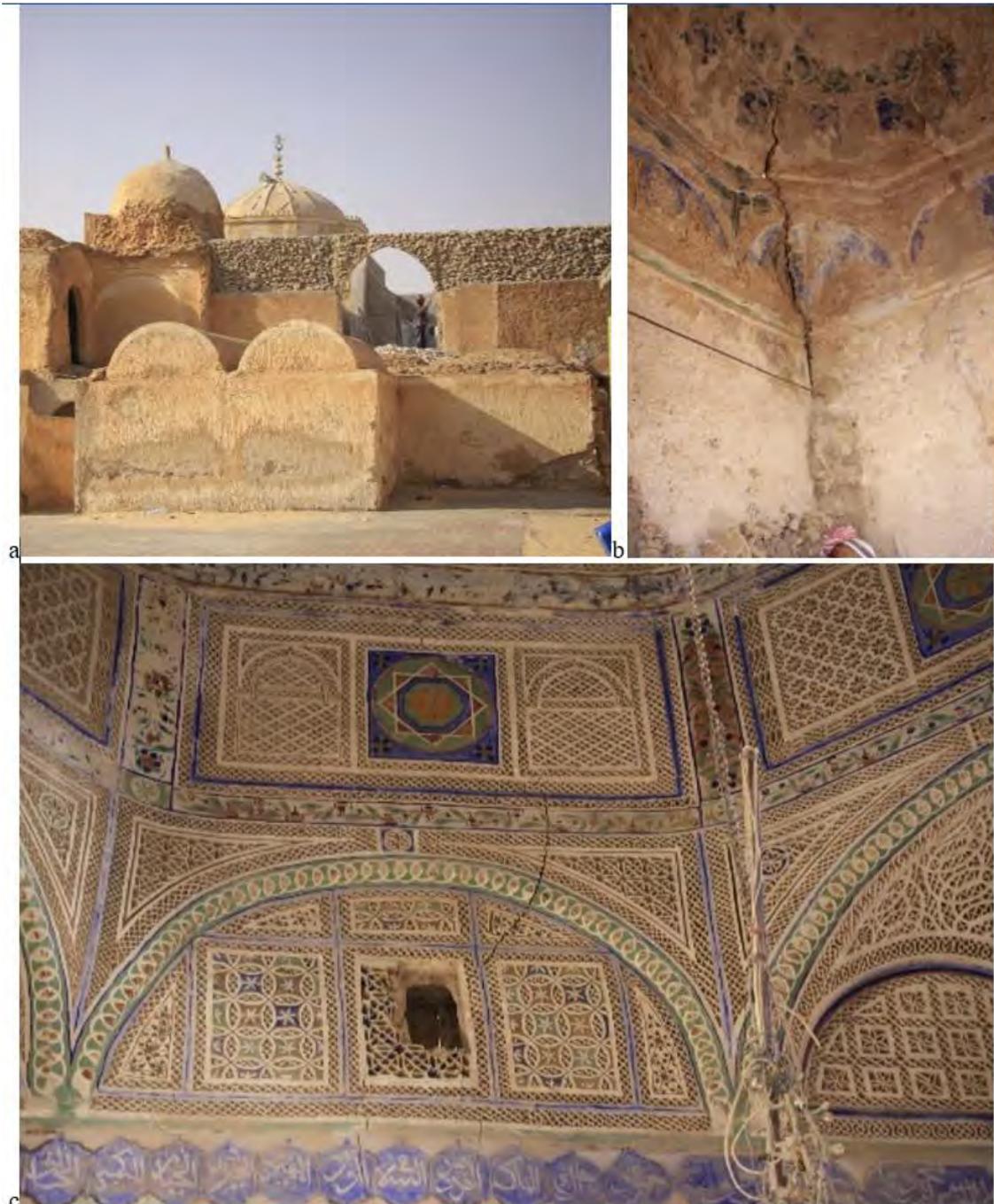


Figure 61. Coupole sphérique : a. Vue extérieur sur la coupole ; b. Trompe de la coupole. c. Décoration de la coupole octogonale, Zaouïa Ettidjania (l'auteure, 2019).

- *Coupoles et mausolées*

Il est important de noter que le cimetière de Guémar contient des mausolées (tombeau à coupole) abritant les sépultures des personnes sacrées de la région. Les coupoles de ces mausolées sont de typologie différente. Ces coupoles sont construites avec les mêmes matériaux locaux extraits dans la région. Entre autres, la typologie de la coupole demi-sphérique, est la plus dominante parce qu'elles se trouvent dans plusieurs

mausolées. D'autre part, la typologie de la coupole conique est présente, c'est une coupole de révolution avec un profil surélevé, qui semble aplati des quatre côtés pour s'adapter à la disposition quadrangulaire de la base (Figure 62).



Figure 62. Coupoles des mausolées, Guemar (l'auteure, 2019).

2. Les voûtes

L'utilisation des voûtes est apparue pendant la période coloniale, un dispositif utilisé avec les coupoles pour couvrir les maisons coloniales, sous forme de voûte en berceau, réalisées avec des matériaux locaux (Figure 63.a). Cette typologie a été transmise dans le tissu traditionnel, dont certaines maisons anciennes qui ont subi une réhabilitation, une série des coupoles a été remplacée par une seule voûte en berceau de dimensions 2 x 5 m ou plus, ou bien un espace qu'est couvert par une série de petites voûtes en berceau (Figure 63.b). Dans ce dernier cas de figure, le plus fréquent est l'utilisation des poutrelles métalliques entre chaque deux voûtes, elles permettent de transmettre les charges aux deux murs (Figure 63.b). D'autre part, se trouve la voûte croisée dans certaines habitations mais avec un nombre très bas. Cette typologie est présente plus dans la *Zaouïa Ettidjania* (Figure 60.a & 61.a).



Figure 63.a. Voûtes en berceau, maisons coloniales, Guemar. b. Voûtes en berceau et voûte croisée, maison traditionnelle, Guemar (l'auteure, 2018&2019).

3. Système de couverture rare dans la région

La *Zaouïa Ettidjania* a des systèmes de couverture uniques, elle est considérée comme le premier édifice doté d'un plancher plat, qui repose sur des rondins de bois de palmier qui jouent le rôle structurel d'éléments de franchissements. Cet édifice est connu aussi d'avoir une pyramide construite en brique qui couvre un espace sacré dans la *Zaouïa* (Figure 64).



Figure 64. Toiture : plancher plats et pyramide, Zaouïa Ettidjania, Guemar (l'auteure, 2019).

3. Conclusion

Vu que la cellule à coupole est le module de base dans la composition de la maison *Soufi* (Figure 65), elle était prise comme référence pour décrire, d'abord, ses dimensions en se référant au tableau 1 et la Figure 44. En effet, la base de la cellule, qui a une forme cubique approximativement, a des dimensions moyennes de 2.20m de longueur, 2.18m de largeur et 2.12m de hauteur. Cette forme cubique est couverte par une coupole qui peut être classer en deux sous-typologies, selon sa hauteur. Ensuite, la description de tous les éléments constructifs de la cellule à coupole à savoir : les fondations, les murs, les contreforts et les coupoles, leurs matériaux et processus de construction a été faite (Figure 65). La maçonnerie de la *Rose des Sables* avec le mortier de gypse est constituée de tous les éléments constructifs de la maison du *Souf*. Une fois la construction terminée, il est difficile de distinguer la texture de la maçonnerie, les blocs du mortier de plâtre car le mur apparaît comme une sorte de conglomérat.



Figure 65. Processus de construction de la cellule à coupole en *Rose des Sables* (l'auteure).

En ce qui concerne la qualité de cette maçonnerie, il est important de noter que les liaisons entre les murs sont assez faibles car l'extrême irrégularité des blocs ne permet pas de réaliser des jointures ou d'obtenir un bon emboîtement par superposition de blocs. Les liaisons ne sont pas assurées, en outre du mauvais recouvrement des blocs, que par la cohésion offerte par le mortier d'assise. Sur le dessus des parois cellulaires, la coupole s'élève et la connexion n'est représentée que par la capacité de cohésion du

mortier d'assise, D'autre part, et due à la qualité de l'architecture vernaculaire caractérisée par le travail de l'homme local sans instruction, les coupoles traditionnelles sont connues par leur caractère fort d'asymétrie et d'irrégularité de la forme, aussi à cause de la forme de la pierre (Figure 66). De ce fait, ces coupoles présentent aussi un nombre de défauts liés aux problèmes de mise en œuvre.



Figure 66. Maillage d'une coupole relevée par scanner laser 3D, montrant l'irrégularité de la forme (l'auteure).

Cette première vision sur la qualité de la maçonnerie et des éléments constructifs traités dans ce chapitre permet d'identifier les points fragiles, les risques techniques et la dynamique de dégradation de cette architecture locale. Cette étape est cruciale dans l'analyse des systèmes de construction, car elle facilite l'identification des faiblesses possibles et des améliorations potentielles de la technique traditionnelle. De plus, la description technique des éléments de construction permet de comparer les différentes techniques d'évaluation des points forts et faibles, des risques techniques et servirait de base à l'analyse structurelle du comportement mécanique dans les prochains chapitres.

PARTIE 2

PROCESSUS METHODOLOGIQUE DE DIAGNOSTIC

Chapitre 3 : Investigation in situ et diagnostic

La présente recherche fait suite aux constatations mentionnant l'accélération du processus de dégradation et de disparition du patrimoine architectural vernaculaire du Souf (Figure 67). À partir de ce constat, il est important de mener une investigation et un diagnostic in situ sur les constructions vernaculaires en *Rose des Sables* à *Guemar*, qui est l'aire d'étude choisie pour cette recherche (Supra chapitre 1), dans le but d'évaluer leur état de dégradations. Le travail commence d'abord par la détermination de l'état de conservation et les menaces qui entourent ce patrimoine. Ensuite, il se poursuit par une étude typologique structurelle afin d'évaluer, de répertorier, d'inventorier et de classer les différents désordres ayant causés des dommages à cette construction. Cette phase préliminaire vise à classer les pathologies constatables pour orienter l'étude en fonction des phénomènes de dégradation afin de déterminer les causes potentielles et leurs origines.



Figure 67.a. Vue sur le centre de Guemar, début des années 90 (Sébe, 1991). b. Vue sur le centre de Guemar (l'auteur, 2019).

1. État de conservation et menaces

Le centre de *Guemar* comme tous les centres de la région, est menacé par de nombreux aléas, tant naturels qu'anthropiques, et par conséquent il est en état de dégradation continue. Concernant les aléas anthropiques, les menaces sont liées à des dynamiques sociales, économiques et culturelles complexes, dont l'analyse ne fait pas l'objectif de la présente recherche. Principalement, Avec le succès des changements absolument légitimes dans les modèles de logement, les cultures de construction

traditionnelles ne sont pas reconnues comme un atout et deviennent incapables de résister à la diffusion des technologies modernes standardisées.

De même pour des contextes similaires, au *Souf* généralement et à *Guemar* particulièrement, de nombreuses interventions de restauration et de reconstruction sont basées sur des structures en béton armé, des murs en maçonnerie de remplissage (en briques creuses), des toitures en tuiles de fibre de verre et de feuilles métalliques, et une substitution systématique du gypse par du ciment (Figure 68). Tout cela permet la création d'environnements qui tendent à s'aligner sur ceux appartenant à un modèle de logement contemporain, mais informelle et chaotique, rejetée du point de vue culturel bien que fortement convoitée comme symbole de prospérité. Cependant, les habitants ne sont souvent pas conscients que contrairement aux bâtiments traditionnels - durables et en harmonie avec l'environnement -, les constructions contemporaines, lorsqu'elles sont informellement construites comme dans ce cas, elles ne conviennent pas aux conditions climatiques des zones désertiques et, en fin de compte, elles offrent une qualité de vie médiocre. Tous ces actes sont accompagnés par l'absence de la volonté de la part de l'autorité publique responsable afin de protéger ce patrimoine par un classement national et une sensibilisation des habitants aux valeurs patrimoniales et les bonnes conditions de vie que l'architecture vernaculaire leur offre. Une autre menace pour ce patrimoine est la perte de connaissances sur le mode constructif traditionnel, qui rend la consolidation plus coûteuse, voire impossible, que la démolition et la reconstruction. Le manque d'intérêt pour les bâtiments traditionnels, génère un manque de soins et d'entretien, les exposant ainsi à toutes les menaces naturelles liées aux conditions climatiques sévères de la région.



Figure 68. a. Restauration du monument historique Zaouia Ettidjania avec des matériaux industriels, (l'auteure, 2019). b. Réparation des fissures au niveau de la coupole par le ciment, Guemar (l'auteure, 2018). c. Maçonnerie de remplissage (en briques creuses), Guemar (l'auteure, 2019).

Dans ce contexte, les actions altérantes du patrimoine bâti à *Guemar* sont facilitées par la typologie particulière des murs qui, de par sa nature (blocs et mortier de gypse minéraux) et sa disposition irrégulière, ce qui les rendent très vulnérables aux actions extérieures. En particulier, les principales causes de dégradation sont liées aux conditions climatiques et géologiques de la région. Principalement, la présence de l'humidité, en raison de la remonté d'eau par capillarité au sol due au soulèvement de la nappe phréatique pendant les dernières décennies (Bel & Cuhe, 1970; Khechana, 2007; Khechana et al., 2010; Khezzani & Bouchemal, 2018; Saibi et al., 2009), et qui attaque les blocs et le mortier de gypse très sensible à l'eau. De plus, les tempêtes de sable et de poussière causées par des vents violents provoquent l'érosion et la désintégration du plâtre protecteur. Les cycles de gel-dégel (en raison de l'écart du

gradient de température entre la nuit et le jour (Boulifa, 2012), dégradent considérablement les matériaux de construction et affectent négativement leur comportement.

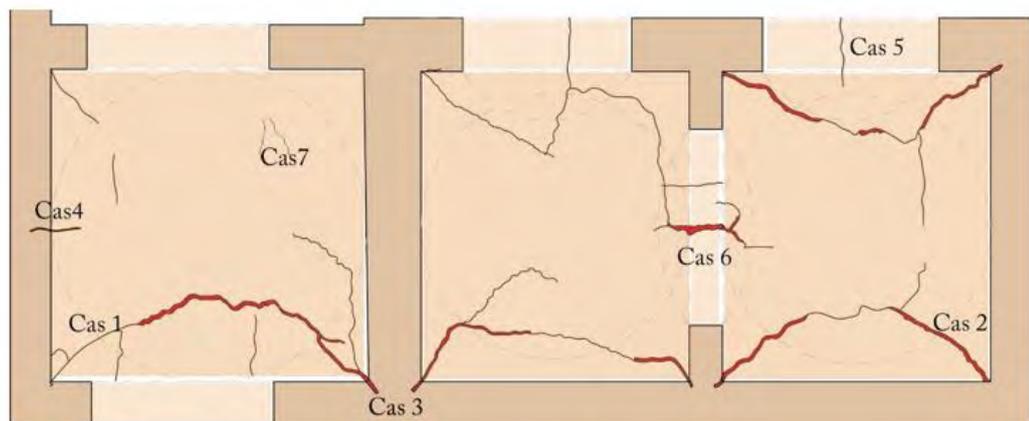
Malheureusement, le phénomène de dégradation du patrimoine architectural du *Souf* en raison des aléas anthropiques et naturels est répandu. Le niveau de dégradation observé est de différents niveaux de gravité, variant de petites lésions superficielles à des zones entières démolies et reconstruites de manière incongrue. Quoi qu'il en soit, le problème le plus préoccupant est la vitesse à laquelle la perte de ce patrimoine se produit, comme les analyses comparatives de l'état de conservation (Figure 67) même à une distance d'un an nous permettent clairement de le comprendre.

2. Inventaire des phénomènes de dégradation au centre historique *Guemar*

À travers une investigation *in situ* sur l'ensemble des constructions vernaculaires à *Guemar*, habitées ou en état de ruine, un inventaire d'un ensemble des pathologies remarquables a été élaboré et cité selon la répétitivité des cas, en basant aussi sur des méthodes permettant l'exploitation des modèles 3D HBIM pour détecter certains désordres (Arias et al., 2005, 2007; Castellazzi et al., 2017a; Fregonese et al., 2013; Mukupa et al., 2016) :

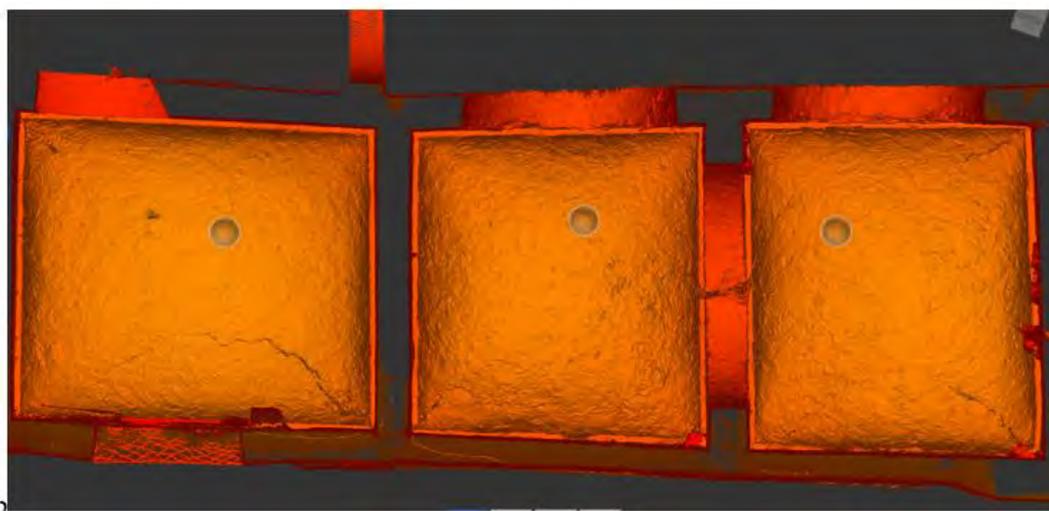
a) Lésions de la maçonnerie (fracture et fissure)

Les modèles de fissures et fractures constatés lors des relevés sur site sont récurrents dans plusieurs bâtiments. Ces schémas de fissures et fractures sont répétés de manière très similaire, mettant en évidence différentes étapes de progression des dommages dans divers cas. Ces schémas ont été représentés dans un cas de trois cellules à coupole d'une maison (Figure 69.a). Les investigations *in situ* de ce cas ont été réalisées à l'aide d'un relevé manuel et un relevé 3D par le scanner laser (Figure 69.b).



- Légende:
-  Fracture
 -  Fissure
- Cas 1: Fissure au coin et au long des diagonales de la coupole.
 - Cas 2: Fracture au coin et au long des diagonales de la coupole.
 - Cas 3: Fracture à l'intersection des murs de support.
 - Cas 4: Fracture verticale dans la partie centrale de la paroi et la coupole.
 - Cas 5: Fissure dans la partie haute de l'arc.
 - Cas 6: Fracture traversante dans la partie haute de l'arc.
 - Cas 7: Fissures superficielles.

a



b

Figure 69.a. Modèles de fissures récurrentes dans les coupoles, parois et arcs (l'auteur). b. Vue de bas sur l'intrados des coupoles, nuage de point (l'auteur).

Le phénomène le plus répandu est caractérisé par des fissures moyennes de 2mm ou plus, situées aux coins des coupoles à ressort (Cas 1 selon la légende de la Figure 69.a & Figure 70.a), et avec le temps elles se transforment en fractures (Cas 2 selon la légende de la Figure 69.a & Figure 70.b). Ces dernières courent le long des diagonales de la coupole (Figure 70.b&c) et l'intersection entre les murs de support (Cas 3 selon la légende de la Figure 69.a & Figure 70.c).



Figure 70.a. Fissure au coin et au diagonal de la coupole (l'auteure, 2019). b. Fractures au coin et au long de diagonales de la coupole (l'auteure, 2019). c. Fracture à l'intersection des parois et au long du diagonal de la coupole (l'auteure,2019).

Ces fractures sont épaisses et mesurent environ 5 cm et avec l'absence de l'entretien, ces fractures se transforment en fractures traversantes et des lézards (Figure 71). Ces mesures sont prises à partir de nuages de points du relevé 3D (Figure 72. a& b). À l'aide de ce relevé, la donnée de la profondeur des fractures a été obtenue (Figure 72.c), celle-ci est caverneuse comme le prouvent les mesures prises dans la fracture de l'intrados de la coupole et peuvent atteindre 13 cm environ (Figure 72.d), alors que l'épaisseur moyenne de la coupole est 16 cm.



Figure 71. Fractures traversantes et lézards au coin et au long de diagonales de la coupole (Luisa Rovero, 2019).

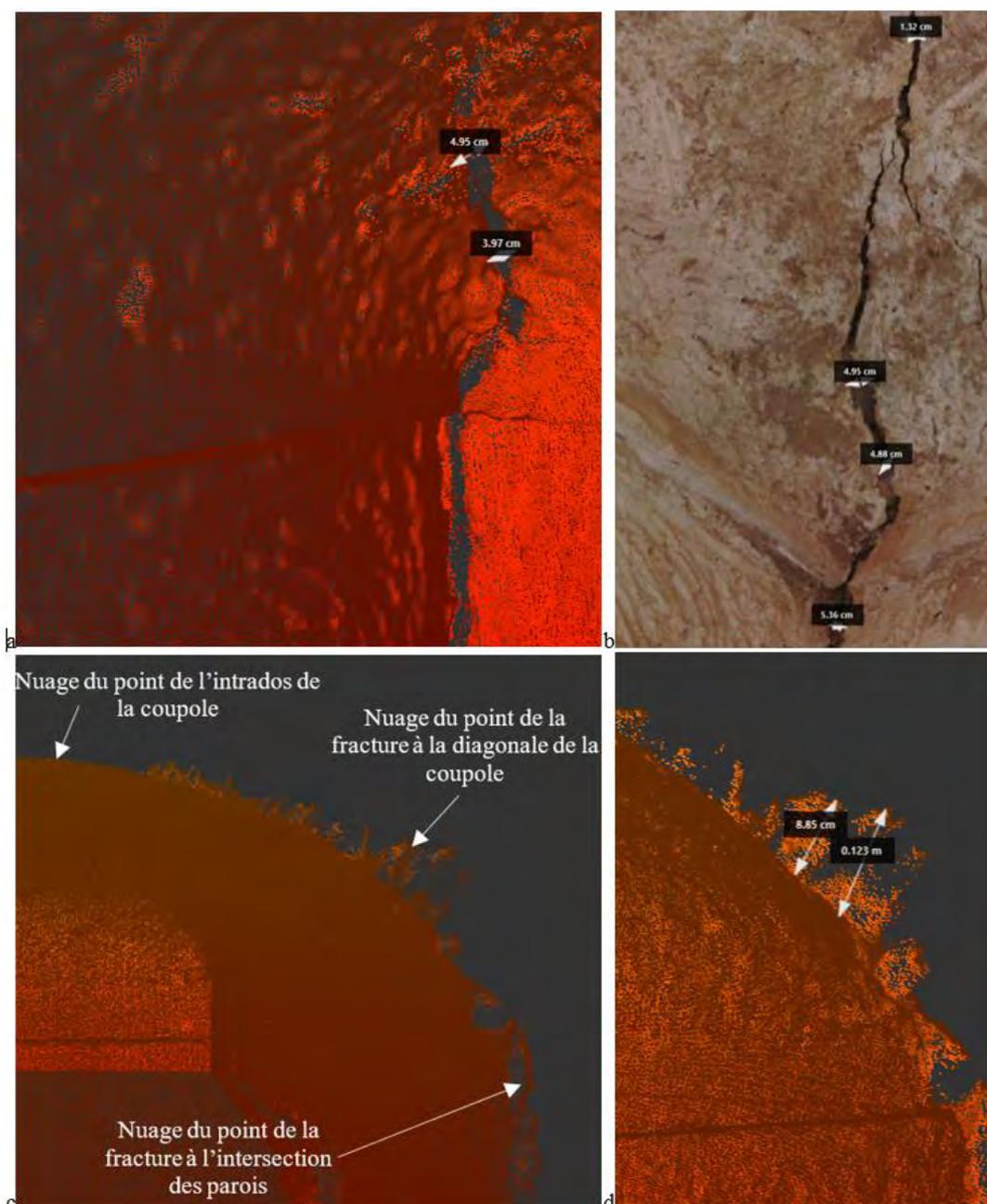


Figure 72. Mesurément de l'épaisseur des fractures à partir du relevé 3D avec le scanner laser : a. à partir du nuage de point ; b. dans l'image. (L'auteure). c. Nuage de point du relevé laser scanner 3D montant l'intrados de la coupole et la profondeur des fractures. d. Mesurément de la profondeur des fractures à partir du nuage de points (Cheima Azil & Boualem Djebri).

Un autre phénomène de fracturation, moins visible et moins épais par rapport aux cas précédents est répandu, il s'agit des lésions approximativement verticales dans la zone centrale des parois avec un déclencheur dans la zone de contact avec la coupole (Cas 4 selon la légende de la Figure 69.a & Figure 73). Dans certains cas, cette fracture se propage de bout en bout dans la coupole, en la divisant au milieu.

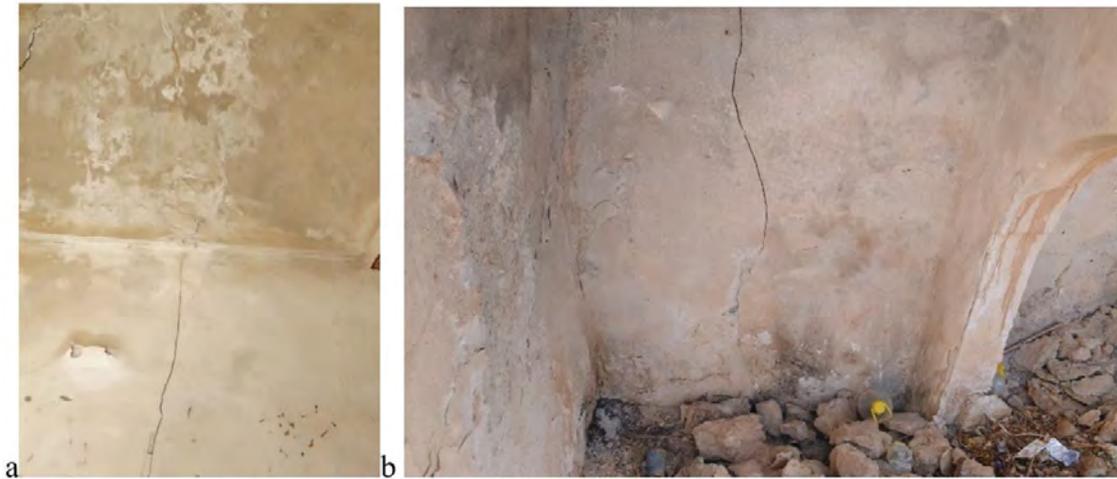


Figure 73. Fracture verticale dans la zone centrale de la paroi et la coupole (Luisa Rovero, 2019).

Aussi, les arcs, qui sont utilisés dans la galerie extérieure et ceux utilisés à l'intérieur entre les deux cellules, ont subi des fissures dans leur partie haute (Cas 5 selon la légende de la Figure 69.a & Figure 74.a), et qui se transforment avec le temps en fractures (Cas 6 selon la légende de la Figure 69.a, Figure 74.b). Ces lésions se situent généralement dans la clé de l'arc ou à proximité, en sectionnant l'arc au milieu (Figure 74.b). L'arc, qui joue le rôle d'articulation entre deux cellules et qui portent une partie de la charge des deux coupoles, se caractérise par des lézards très épais qui mesurent jusqu'à 16 cm (Figure 74.c), et qui traversent toute l'épaisseur de l'arc (Figure 74.c&d), et tendent à se prolonger verticalement vers la coupole (Figure 74.a)

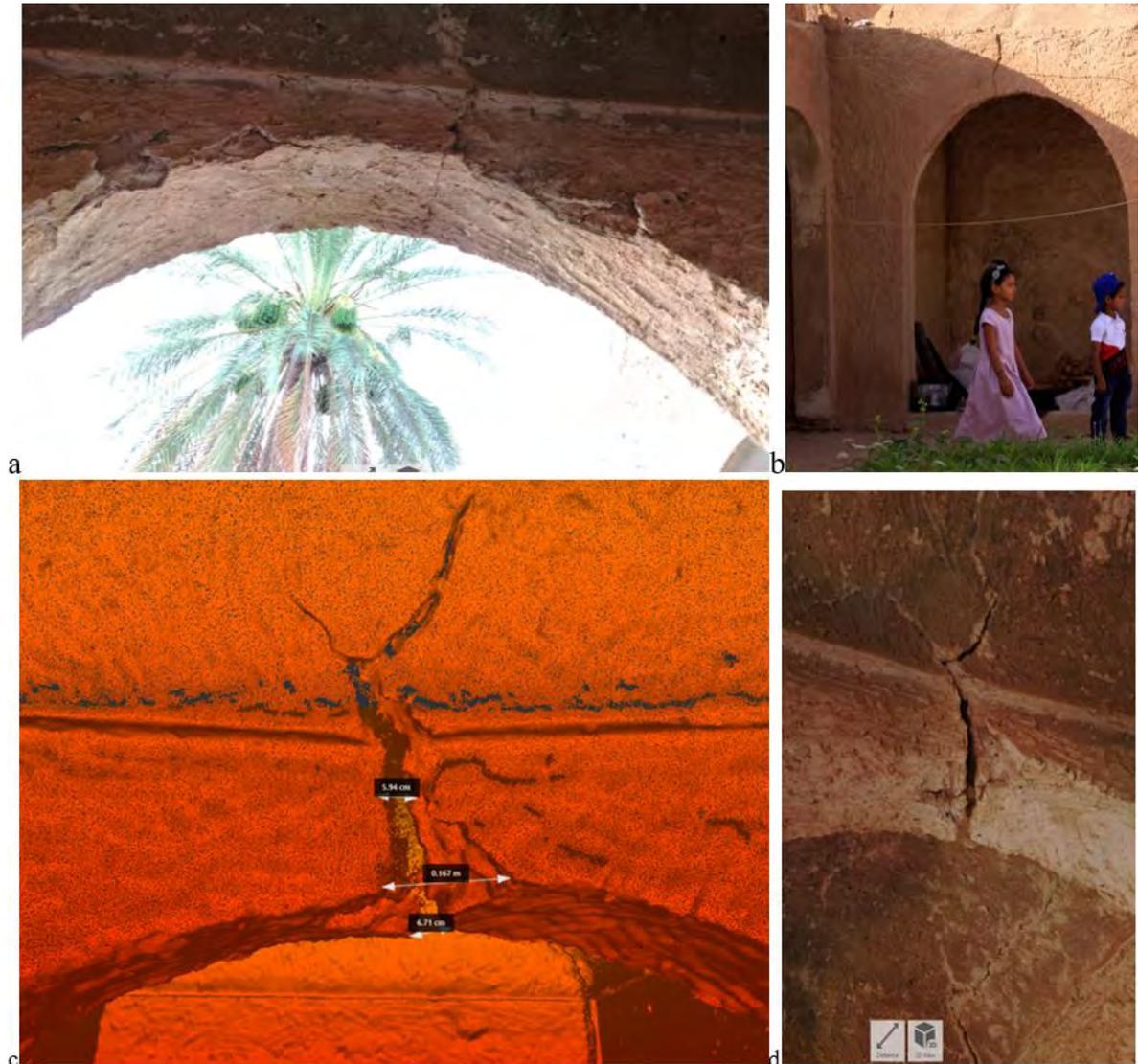


Figure 74. a & b. Fissure et fracture verticale au niveau de l'arc de la galerie de la maison (l'auteure, 2019 & Sofia Nembrini, 2019). c. Mesurément de l'épaisseur de la fracture au niveau de l'arc de liaison entre les deux cellules à coupoles (L'auteure). d. Fracture verticale traversante au niveau de l'arc de liaison entre les deux cellules à coupoles (l'auteure).

Par ailleurs, des fissures superficielles ont été observées, et qui sont très peu visibles à cause de leurs épaisseurs très minces. Elles sont classées comme des microfissures touchant la couche extérieure car elles se forment dans le plâtre utilisé pour protéger la maçonnerie (Cas 7 selon la légende de la Figure 69.a, & Figure 75).



Figure 75. Fissure superficielle (Luisa Rovero, 2019).

b) Effondrements

Les fractions et les lézards cités précédemment causent des effondrements partiels et totales sur les différents éléments de la structure des maisons (Figure 76). De ce fait, il est nécessaire d'organiser ces endommagements selon le facteur de répétitivité et de gravité. Par conséquent, une classification des cas d'effondrements a été fait, en cherchant ceux qui se répètent le plus souvent, et en déterminant la relation entre eux et les fractures et lézards observés dans le point précédent.



Figure 76. Maisons endommagées à cause de l'effondrement de ses éléments, Guemar (l'auteure, 2019).

D'abord, l'effondrement le plus courant est l'effondrement partiel en diagonal de la coupole (Figure 77). Cela est dû au jointement ou l'intersection des fractures aux coins des coupoles à ressort (Cas 1 selon la légende de la Figure 69.a & Figure 77.a), qui courent le long des diagonales de la coupole évoluant avec le temps, en outre du manque

d'entretien. Ce dernier engendre également un effondrement total qui touche les deux parois qui portent la partie effondrée de la coupole (Figure 77.b&c).

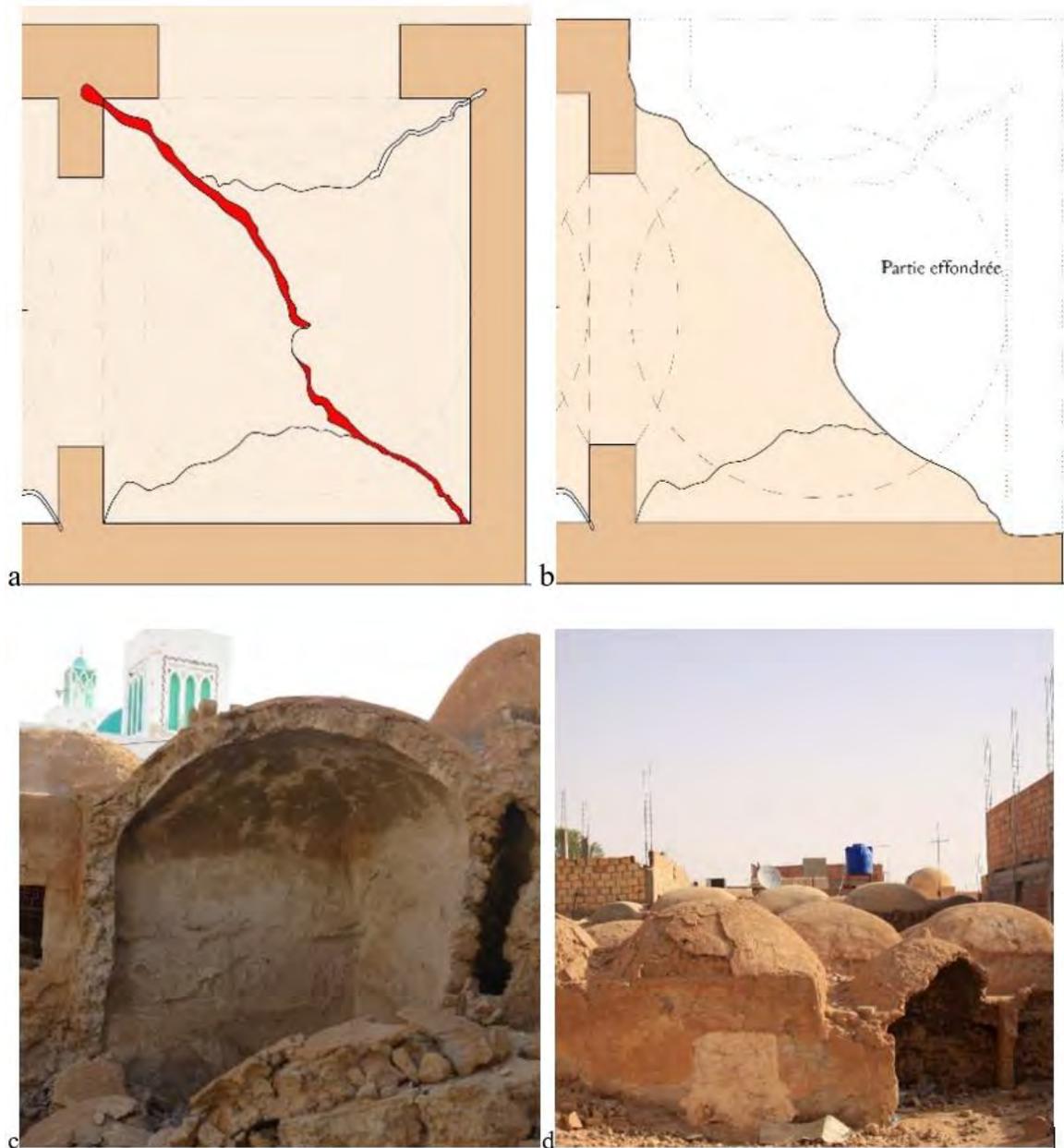


Figure 77. a. Plan montrant le jointement des deux fractures au long du diagonale de la coupole (l'auteure). b. Plan montrant l'effondrement de la moitié de la coupole au niveau de diagonale(l'auteure). c & d. Effondrement de la moitié de la coupole au niveau de de diagonale et les parois soutenant cette partie, Guemar (l'auteure,2019).

En second lieu, un phénomène d'effondrement qui est aussi répandu que le précédent cas, Il s'agit de l'effondrement de deux parties attachées de deux cellules à coupoles accolées et jointes par une arcade (Figure 78& 79.a). L'effondrement commence du coin extrême de la première coupole (point 1 selon la Figure 78.a, b, c&d) en traversant le milieu de l'arrête commune entre les deux coupoles et qui se

superpose sur l'arc d'articulation (point 2 selon la Figure 78.a, b, c &d), et se termine avec le jointement du coin extrême de la deuxième coupole (point 2 selon la Figure 78.a, b, c &d) qui se situe dans la même ligne du premier coin.

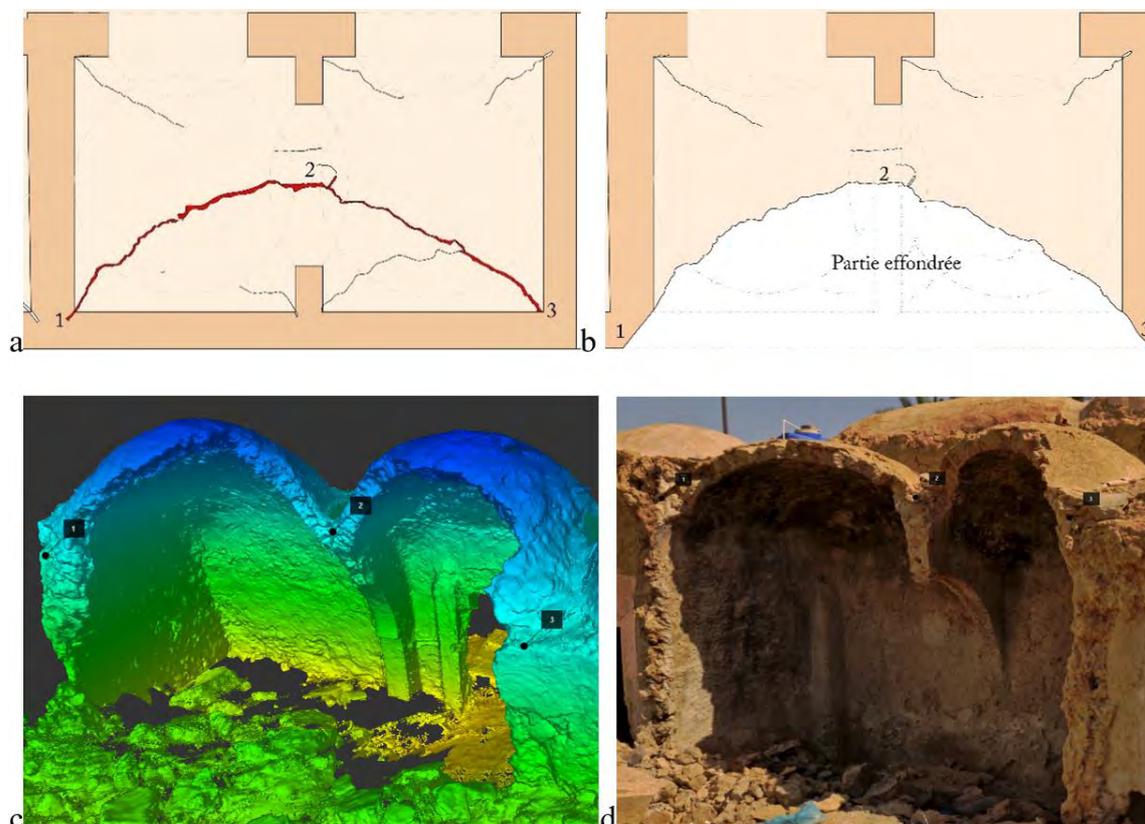


Figure 78. a. Plan montrant le jointement des trois fractures : deux fractures aux coins des deux coupole (point 1 et 3), et la fracture verticale au niveau de l'arc de liaison entre les deux cellules, (point 2), (l'auteure). b. Plan montrant l'effondrement des deux parties des deux coupoles à cause de jointement des fractures selon Figure 87.a (l'auteure). c. Vue 3D de nuage de points montrant l'effondrement des deux parties des deux coupoles à cause de jointement des fractures selon figure 78.a (Cheima Azil & Boualem Djebri). d. Image des effondrements des deux parties des deux coupoles à cause de jointement des fractures selon la figure 78.a (l'auteure, 2019).

Cet effondrement est le résultat du jointement de trois fractures, à savoir les deux fractures du coin des deux coupoles, et qui trace la moitié de ses diagonales (Cas 1 selon la légende de la Figure 69.a) qui se positionnent symétriquement par rapport à l'arrête commune entre les deux coupoles. Elles s'articulent au milieu par la fracture verticale ou le lézard au centre de l'arc de liaison entre les deux cellules et qui se prolongent dans les deux coupoles (Cas 6 selon la légende de la Figure 69.a & Figure 78.b). L'effondrement des parties des coupoles et les fissures au coin à l'intersection des paroi (Cas 1 selon la légende de la Figure 69.a) engendrent également l'effondrement de la paroi qui portent ces deux coupoles (Figure 78.b,c &d & Figure 79.a)



Figure 79. a. Image des effondrements des deux parties des deux coupoles à cause de jointement des fractures selon la figure 78.a (l'auteur, 2019). b. Effondrement des deux parties des deux coupoles passant par la moitié de l'arc de liaison (Giovanni Gubitosa, 2019).

En troisième lieu, l'autre phénomène d'effondrement au niveau de la coupole, qui est moins courant aux précédents, constitué en l'effondrement d'un quart de la coupole, commence du coin de la coupole en passant par la moitié de sa diagonale et retourne vers la moitié de l'axe qui divise la coupole en deux (Figure 80). Ce phénomène d'effondrement peut être engendré dans deux cas (Figure 80.a &b) : Le premier cas (Figure 80.a), il est dû à l'intersection de la fracture au coin de la coupole et qui trace la moitié de sa diagonale (Cas 1 selon la légende de la Figure 69.a) avec la fracture verticale au centre de l'arc de liaison entre les deux cellules et qui se prolongent en longueur sur la ligne de la moitié de la coupole (Cas 6 selon la légende de la Figure 69.a). Le deuxième cas (Figure 80.b), il est le résultat de l'intersection de la fracture au coin de la coupole traçant la moitié de sa diagonale (Cas 1 selon la légende de la Figure 69.a) avec la fracture verticale au milieu de la paroi qui se prolonge au centre de la coupole (Cas 4 selon la légende de la Figure 69.a).



Figure 80. a. Plan montrant l'intersection de la fracture au coin de la coupole le long de la moitié de sa diagonale et la fracture verticale au centre de l'arc de liaison prolongeant dans la moitié de la coupole (l'auteure). b. Plan montrant l'intersection de la fracture au coin de la coupole le long de la moitié de sa diagonale et la fracture verticale au milieu de la paroi qui se prolonge au centre de la coupole (l'auteure). c. Plan montrant l'effondrement d'un quart de la coupole (l'auteure). d. Vue extérieure d'une cellule avec une coupole avec son quart effondré (l'auteure, 2019). e. Vue 3D de nuage de point en haut d'une coupole avec son quart effondré (l'auteure). f. Vue 3D de nuage de point à l'intérieur d'une cellule et en bas d'une coupole avec son quart effondré (l'auteure). g. Vue à l'intérieur d'une cellule et en bas d'une coupole avec son quart effondré (l'auteure, 2019).

En quatrième lieu, l'autre effondrement observé au niveau des coupoles est considéré moins commun. Il prend la forme d'un arc dans la coupole, qui relie deux coins adjacents incluant la paroi qui porte cette portion (Figure 81). L'effondrement se génère du jointement de deux fractures aux coins adjacents de la coupole (Cas 1 selon la légende de la Figure 69.a) , et qui tracent approximativement les moitiés de ses diagonales (Figure 81.a).

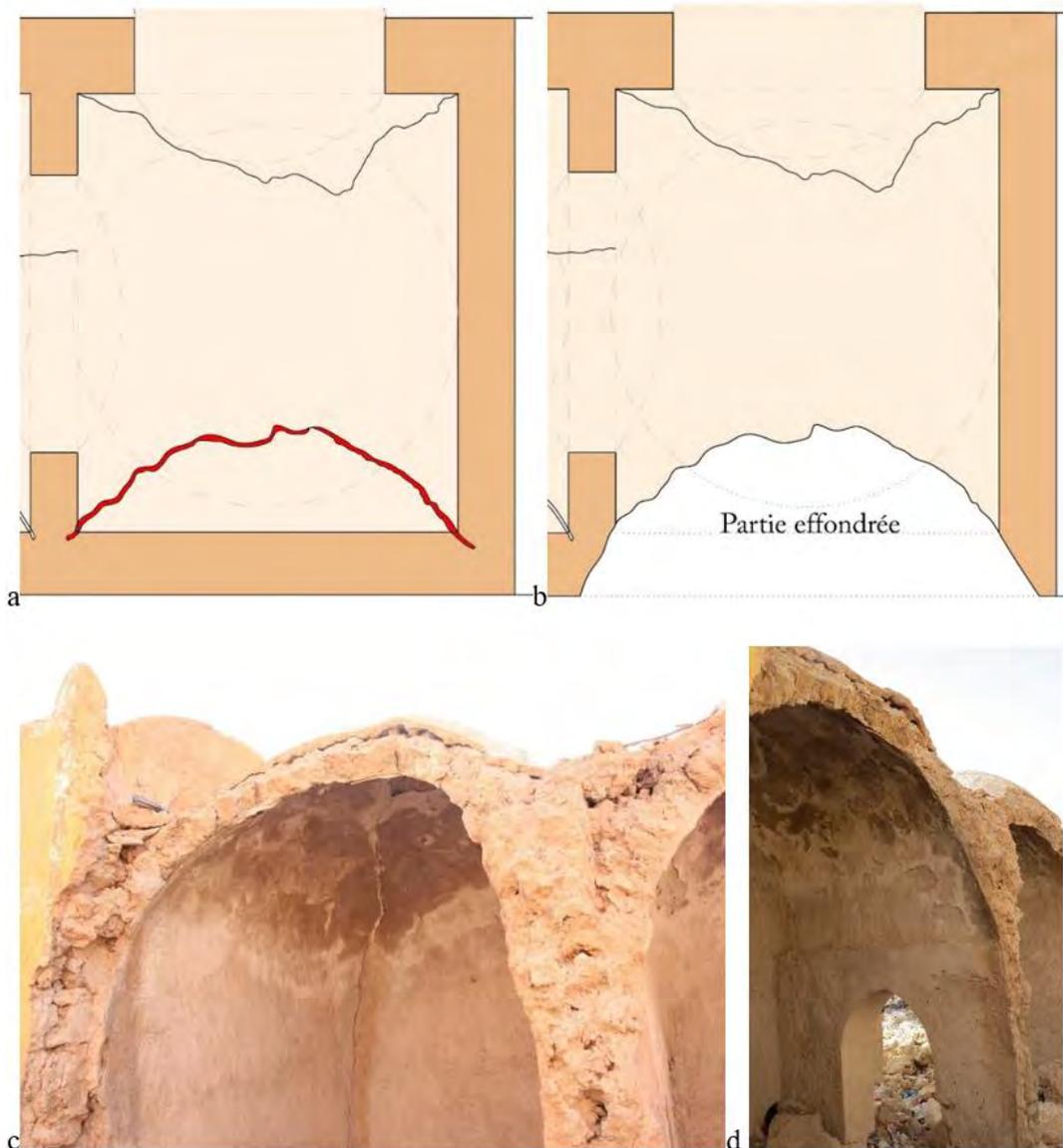


Figure 81. a. Plan montrant le jointement des deux fractures aux coins adjacents de la coupole traçant les moitiés de ses diagonales (l'auteur). b. Plan montrant l'effondrement d'une partie de la coupole selon deux moitiés des diagonales (l'auteur). c & d. Effondrement d'une partie de la coupole selon deux moitiés des diagonales, Guemar (l'auteur, 2019).

Enfin, un autre type d'effondrement attaque seulement l'élément vertical de la maison sous forme de cavités centrales au niveau des milieux des parois (Figure 82), ou bien un effondrement total de celles-ci. Le phénomène d'effondrement est engendré

par des fissures observées au milieu des parois (Cas 4 selon la légende de la Figure 69.a & Figure 82.a).

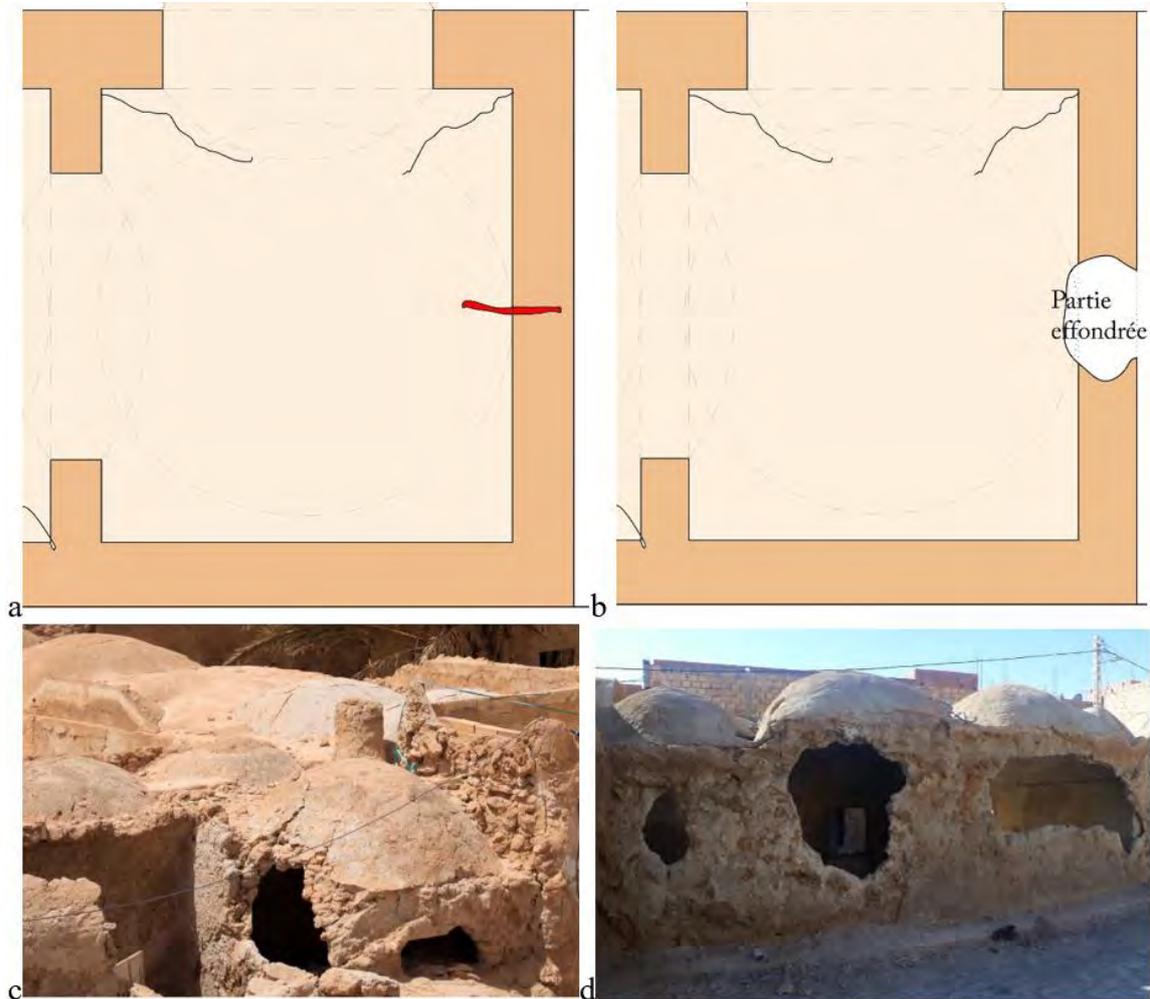


Figure 82. a. Plan montrant la fracture centrale au niveau de la paroi (l'auteure). b. Plan montrant l'effondrement de la paroi sous forme des trous (l'auteure). c & d. Effondrement sous forme des cavités au niveau centrale des parois, Guemar (l'auteure, 2019 & 2018).

c) Déformation de la maçonnerie

Le phénomène de déformation de la maçonnerie est marqué dans les murs porteurs. En effet, il est remarqué qu'il existe un flambement ou une inclinaison dans les murs surtout ceux à l'intérieur dont l'épaisseur est faible. Ce phénomène est présent dans les cas des constructions avec des fissures importantes et des effondrements dans les coupoles et les parties supérieures des murs. Il est important à noter que ce phénomène est peu remarquable, surtout que cette déformation est peu visible à l'œil nu. A cet effet, une quantification de la déformabilité et l'inclinaison a été faite à l'aide de maillage triangulé obtenu à partir d'un nuage de point de relevé (Figure 83), un maillage caractérisé par la préservation de la forme originel de la construction.



Figure 83. a. Maillage triangulé d'une cellule à coupole avec un mur déformé. b. Quantification de l'inclinaison d'un mur à partir d'une section au niveau du maillage triangulé d'une cellule à coupole (l'auteure).

d) Effritements du plâtre et du mortier de jointoiment

Le phénomène d'effritement du plâtre, qui protège la maçonnerie, est très remarquable (Figure 84). Il se localise au niveau de la base des murs soit dans sa partie extérieure ou intérieure (Figure 84.a, b, c& d). À cause de cet effritement, la maçonnerie de la pierre de la *Rose des Sables* et du mortier de jointoiment se retrouvent exposés à l'air. Ce qui génère par la suite l'effritement du mortier de jointoiment de la maçonnerie, laissant des trous profonds dans les extrémités transversales de la paroi, et qui conduisent également à l'apparition des a les pierres de la maçonnerie (Figure 84.c&d). Il cause aussi l'effritement de la pierre dans le cas où la partie endommagée n'a pas été réparée, ce qui accélère l'apparition des trous au niveau de la base de la paroi (Figure 84.f). Entre autres, ce phénomène est signalé aussi au niveau des coupoles (Figure 84.e), surtout celles qui ont connu des fissures importantes.



Figure 84. a& b. Effritement du plâtre protégeant la maçonnerie au niveau de la base de la paroi, Guemar (l'auteure, 2019). c. Effritement du plâtre et du mortier de jointoiment de la maçonnerie au niveau de la base de la paroi, Guemar (l'auteure, 2019). d. Section montrant l'effritement du plâtre et du mortier au niveau de la base de la paroi (l'auteure). e. Effritement du plâtre protégeant la maçonnerie au niveau de la coupole, Guemar (l'auteure, 2019). f. Effritement du plâtre et de la maçonnerie créant des trous au niveau de la base de la paroi, Guemar (l'auteure, 2019).

e) Gonflement, détachement et érosion du plâtre

Le phénomène de gonflement et d'érosion du plâtre est remarqué principalement dans la couche du plâtre extérieur des coupoles, dont l'épaisseur est importante. Ce gonflement se trouve généralement dans les coupoles qui ont des fissurations et des déformations de leur maçonnerie et surtout celles qui ont un effondrement partiel (Figure 85.a&b). Ce phénomène se caractérise par l'éclatement et le détachement du plâtre utilisé pour la protection de la maçonnerie, ce qui rend aussi cette dernière fragile face aux aléas naturels qui participent à son érosion.



Figure 85. a & b. Gonflement, détachement et érosion du plâtre dans la couche extérieure des coupoles (l'auteur, 2019).

f) Moisissures et efflorescences

Dans certains cas il est distingué l'existence du phénomène de moisissures et efflorescences dans la base des murs, qui ont également un effritement du plâtre et du mortier de jointoiement (Figure 86.a). Ce phénomène est plus répandu dans les maisons abandonnées et les maisons en ruines, ou certaines maisons qui ont connu des modifications importantes dans leurs structures. Il est observé aussi à l'intrados des coupoles des traces de moisissures et efflorescence (Figure 86.b&c).



Figure 86. Moisissures et efflorescences : a. Au niveau de la base des murs ; b & c. Au niveau de l'intrados de la coupole (l'auteure, 2019).

Le présent inventaire des phénomènes de dégradation a inclus l'identification des pathologies les plus représentatives et répétitives dans la typologie d'architecture traditionnelle du *Souf*. Il est remarqué que les désordres observés sont de types divers. De ce fait, une classification de ces phénomènes de dégradations selon leurs types est nécessaire pour définir leurs origines.

3. Classification des phénomènes de dégradations et leurs origines

La classification des phénomènes de dégradation est le résultat d'un processus d'analyse hypothétique et de superposition des données sur l'état de conservation des édifices. Cela permet de voir les relations entre les différentes pathologies et qui pourraient avoir la même origine. De ce fait, un classement des phénomènes de la même origine a été fait selon la nature de la pathologie, et suivant le type de facteur à l'origine de l'émergence des dégradations. Les causes de dégradation de ces constructions traditionnelles sont de deux types. En premier lieu, le facteur interne de dégradation : les causes de dégradation sont liées à la construction elle-même, à son mode de construction, aux matériaux utilisés et le comportement de cette typologie structurelle. En second lieu, le facteur externe : les causes de dégradation sont sous l'effet de facteurs extérieurs à savoir les phénomènes naturels, autrement dit aléas naturels, à l'image des conditions climatiques dures, ou bien les aléas anthropologiques à l'exemple l'exploitation des usagers de la construction à l'instar des modifications introduites.

a) *Dégradations dues à des facteurs internes*

D'abord, le profil des fissurations, fractions et effondrements observés, qui sont commun dans chaque construction, semble avoir une relation avec la construction elle-même, en mettant en évidence une faiblesse typique de la typologie de construction. Par ailleurs, les fractures aux coins et au milieu des coupoles au *springer*⁴, comme c'est le phénomène le plus répandu, il est également le phénomène le plus dangereux. Elles se propagent le long des diagonales de la coupole, cela pourrait revenir à la question de la discontinuité géométrique de la coupole, plus précisément au niveau de la zone de transition entre les profils carrés et ceux circulaires de la coupole. Le profil de fractures observées est également typique d'une voûte en arc de cloître dont les murs s'écartent vers l'extérieur (Azil, Djebri, & Rovero, 2019; Borri & Bussi, 2011). Selon (Borri & Bussi, 2011), le comportement structurel d'une voûte en arc de cloître, dont la partie inférieure est similaire à la présente coupole en *Rose des Sables*, peut être expliqué en considérant la coupole constituée de deux arcs diagonaux qui transfèrent les poids verticaux, mais pas la poussée horizontale, aux coins de l'unité de construction et une série d'arcs à contreforts volants qui déchargent le poids vertical et la poussée horizontale le long des murs porteurs (Figure 87).

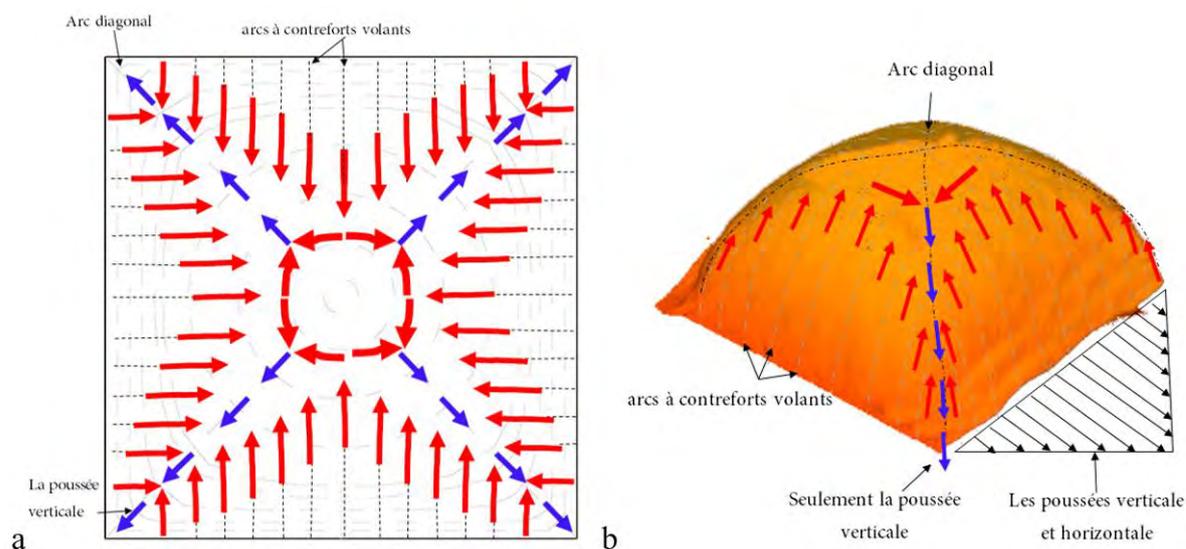


Figure 87.a. Mécanisme résistant dans la coupole en Rose des Sables. b. Poussées concentrées en clé dans les arcades principales du mécanisme résistant de la coupole en Rose des Sables, déduit selon le mécanisme résistant de la voûte en arc de cloître (réalisé par l'auteure, selon (Borri&Bussi, 2011)).

⁴ Le voussoir le plus bas de chaque côté d'un arc. C'est là que le support vertical de l'arc se termine et que la courbe de l'arc commence (Galassi & Tempesta, 2019; Vandal, 2020)

D'ailleurs, en ce qui concerne le phénomène des fractures verticales dans la zone centrale des parois, elles sont aussi le résultat de la série d'arcs à contreforts volants qui déchargent le poids vertical et la poussée horizontale le long des murs porteurs (Figure 87.b & Figure 88.a). Ces fractures affectent également la partie de la base de la coupole comme le suggère l'effet de l'état de contrainte biaxiale le long des parallèles et des méridiens de la coupole qui présente à la fois une flexion horizontale de la paroi et un renversement avec décollement sur les bords (Figure 88.b).

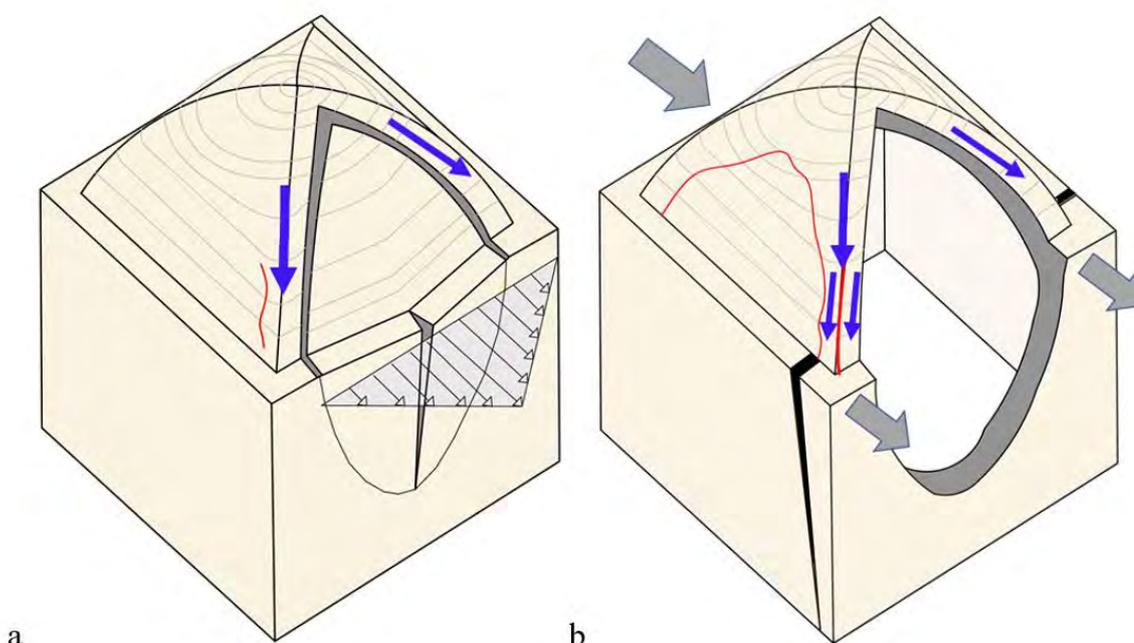


Figure 88.a. Fissuration et décollement des broches dans la coupole en Rose des Sables suite à la flexion hors du plan des murs. b. Evolution de la cinématique d'endommagement suite à l'effondrement de la broche frontale : fissuration de la diagonale (réalisé par l'auteure, selon (Borri & Bussi, 2011).

Ce phénomène est directement lié au grand dallage, qui demeure toujours un sujet de recherche lié à la mauvaise répartition des contraintes générées par les phénomènes de la flexion et de la traction. Ces fissures peuvent s'accélérer du fait que ce matériau semble avoir une faible résistance à la traction, d'autant plus que les blocs de pierre utilisés pour la construction sont très irréguliers et le mortier est abondant. De cette manière, le système de maçonnerie apparaît presque comme un conglomérat. On relève ainsi que toutes les techniques constructives apparentées aux « règles de l'art » de la maçonnerie (Borri et al., 2015; Luisa Rovero et al., 2016) telles que la présence de pierres traversantes, la régularité de la forme des blocs, l'horizontalité des joints et l'étalement des joints verticaux, ne sont pas présents.

Les fractures se transforment en un effondrement partiel, à savoir l'effondrement en diagonal de la coupole et de cavités au niveau des murs, aussi l'effondrement qui prend la forme d'un arc dans la coupole (Figure 81), de plus, le cas d'effondrement d'un quart de la coupole (Figure 80) et l'effondrement deux parties de deux coupole (Figure 78&79). En conséquence, l'effondrement partiel ou total est à cause des problèmes structurels. Par ailleurs, les déformations de la maçonnerie ont aussi une relation avec les phénomènes précédents, lorsque la charge de la structure se modifie avec l'apparition des fractures, celles-ci jouent le rôle de changement du comportement structurel.

En addition à ces causes de dégradation dues aux facteurs internes, d'autres phénomènes relatifs aux aléas externes ont engendré d'autres dégradations. En même temps ces phénomènes ont aggravé l'état de conservation des édifices, surtout quand ces édifices présentent des pathologies dus à des problèmes structurels.

b) Dégradations dues aux facteurs externes

La plupart des phénomènes de dégradation pour le mortier et le plâtre sont dus à des aléas naturels, particulièrement reliés aux conditions climatiques et les transformations aux sous-sols de la région, surtout que le matériau utilisé pour le mortier de jointoiement et le plâtre, le gypse, est par sa nature notoirement fragile aux différents altérations naturels, notamment l'eau.

En ce qui concerne le phénomène d'effritement du plâtre et du mortier de jointoiement à la base des constructions, il est dû principalement à l'humidité, dont la source est la remonté capillaire de la nappe phréatique durant les deux dernières décennies (Bel & Cuhe, 1970; Khechana, 2007; Khechana et al., 2010; Khezzani & Bouchemal, 2018; Saibi et al., 2009). De ce fait, plusieurs analyses ont été effectuées pour vérifier l'existence de cette humidité, à travers l'utilisation d'une caméra d'imagerie thermique (Figure 89).



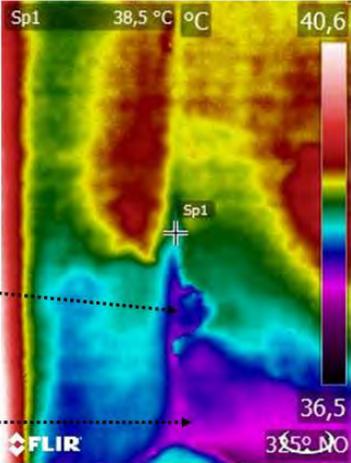
Figure 89. Caméra d'imagerie thermique utilisée, FLIR T460 (Vicario, 2017).

La thermographie mesure le rayonnement infrarouge émis par un corps et détermine sa température de surface, dont les variations peuvent dépendre de divers aspects à savoir : la couleur de la surface ; le type du matériau (briques, pierre, terre, bois...) et la présence d'eau. En effet, à l'aide de la caméra d'imagerie thermique, les mesures de la température des surfaces des constructions ont été faites. Après cette mesure, une évaluation qualitative se fait à la base de la lecture des images prises. Pratiquement, la présence de l'humidité dans la maçonnerie signifie l'existence d'eau à l'intérieur de celle-ci, sachant que l'eau augmente l'inertie thermique de la maçonnerie. Donc, la température des surfaces humides de la maçonnerie, ou bien contenant d'eau, changent (chauffent ou refroidissent) plus lentement par rapport à la température des surfaces non humide de la maçonnerie (Vicario, 2017).

Plusieurs images ont été prises à l'intérieur et à l'extérieur de plusieurs édifices (Figure 90). Le tableau 3, qui contient l'image de la base du mur et l'image thermique de la même surface avec l'explication, montre les résultats obtenus pour plusieurs cas. Ces résultats confirment la présence de l'humidité au niveau des parois, et particulièrement dans la base des murs. D'ailleurs, cette humidité est aussi à l'origine des moisissures et efflorescence observées à la base des constructions abandonnées ou en état de ruines.



Figure 90. Utilisation de la caméra d'imagerie thermique pour mesurer la température des parois de la construction : a. à l'extérieur. b. à l'intérieur (l'auteur, 2019).

Cas	Photo visible	Thermogramme de fausses couleurs
Cas 1	 <p>A visible photograph showing the corner of a room. On the left is a window opening, and on the right is a wall with a textured, possibly plastered surface. The floor is visible at the bottom.</p>	 <p>A false-color thermogram of the wall shown in the visible photo. The color scale ranges from blue (cooler) to red (warmer). A vertical temperature scale on the right indicates values from 36,5 to 40,6. Two specific points are marked with 'Sp1' and a crosshair: one at the top right (38,5 °C) and one in the middle of the wall. Dotted lines with arrows point from text labels to these points: 'Remontée d'humidité par capillarité et décollement partiel du plâtre' points to the middle 'Sp1' point, and 'Remontée d'humidité par capillarité' points to the bottom 'Sp1' point. The FLIR logo is visible at the bottom left of the thermogram.</p>
<p>La photo a été prise Le 23 Juin 2019. Heure : 9 :54</p> <p>Selon les deux photos prises à l'intérieur d'une cellule à coupole, montrant la variation de la température de la même surface du même matériau, particulièrement avec une température basse au niveau de la base du mur par rapport aux autres parties du mur. Cela signifie l'existence d'eau, et bien sûr l'humidité, à cause de la remonté capillaire. Il est aussi à noter qu'un décollement partiel du plâtre relié avec la zone humide.</p>		

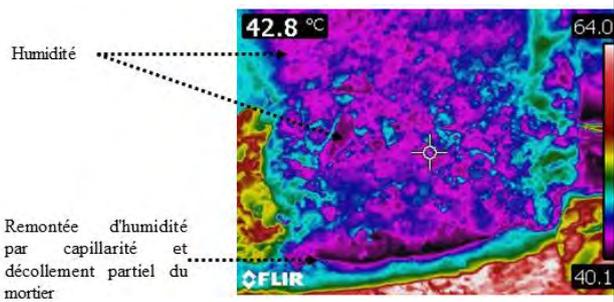
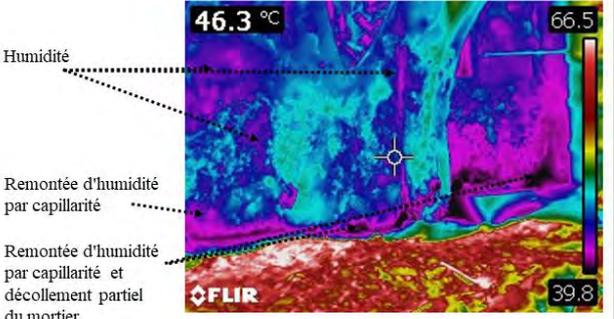
<p>Cas 2</p>		 <p>Humidité</p> <p>Remontée d'humidité par capillarité et décollement partiel du mortier</p>
<p>La photo a été prise Le 23 Juin 2019. Heure : 9 :56</p> <p>Selon les deux photos d'un mur prises du côté extérieur, montrant la variation de la température de la même surface de la maçonnerie sans plâtre. Particulièrement, la température est basse au niveau de la base de mur par rapport aux autres parties du mur, ceci est dû au décollement partiel du mortier à cause de l'humidité résultant de la remonté capillaire. L'humidité est aussi présente dans d'autres parties du mur.</p>		
<p>Cas 3</p>		 <p>Humidité</p> <p>Remontée d'humidité par capillarité</p> <p>Remontée d'humidité par capillarité et décollement partiel du mortier</p>
<p>La photo a été prise Le 23 Juin 2019. Heure : 9 :57</p> <p>Selon les deux photos des parois prises du côté extérieur, montrant la variation de la température de la même surface de la maçonnerie. La température basse est notée particulièrement au niveau de la base des parois, ceci est dû au décollement partiel du mortier à cause de l'humidité résultant de la remonté capillaire. La zone de la température basse, qui se prolonge vers le haut des parois, montre l'humidité et le niveau de la remonté capillaire.</p>		

Tableau 3. Résultats obtenus par l'image thermique (l'auteure).

Pour ce qui est du phénomène de gonflement et d'érosion du plâtre protecteur des coupoles à l'extérieur, il revient aux conditions climatiques de la région caractérisée d'une part, par la rareté des eaux de pluie mais concentrée en quelques jours et d'autre

part, par les tempêtes de sables avec des vents violents. D'un côté, les eaux de pluie participent au gonflement du plâtre, suite à l'infiltration de l'eau qui cause son détachement (Figure 91). D'autre coté, les tempêtes de sables avec des vents violents attaquent cette couche extérieure qui est composée de gypse, sensible à toute altération externe.

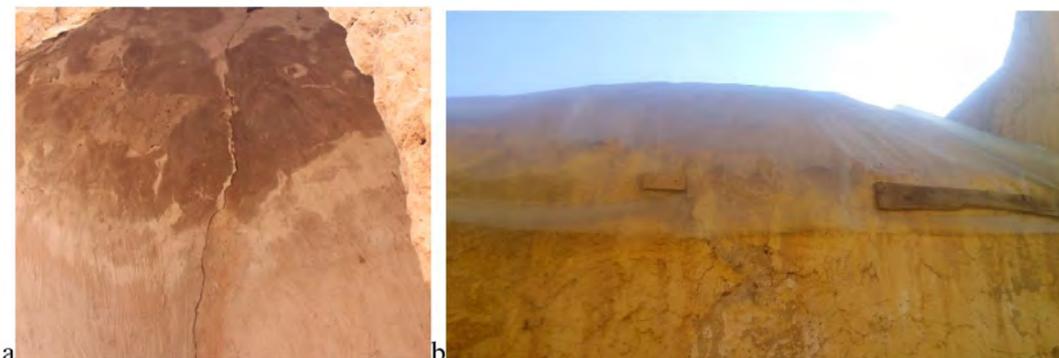


Figure 91. a. Infiltration d'eau à travers la fissure au niveau de la coupole, Guemar (l'auteure, 2018). b. Couverture en plastique pour la coupole utilisée par les habitants, à cause de l'infiltration d'eau, Guemar (l'auteure, 2018).

Il est important de noter que les facteurs internes et externes participent ensemble à l'apparition des dégradations et dans certains cas de les aggraver. En effet, les infiltrations des eaux dans les fissures au niveau des coupoles accentuent le risque d'effondrement à cause des changements de comportement du mortier après son contact avec l'eau. D'autre part, l'humidité qui attaque la base de la maçonnerie a un effet négatif sur le comportement de cette dernière, ce qui peut créer des fractures et des déformations.

Pour conclure, la liste des phénomènes de dégradation ainsi que la liste hypothétique d'origine des dégradations est non exhaustive. De plus, l'origine des pathologies observées peut provenir de la combinaison de plusieurs causes ce qui rend la problématique délicate. Enfin, il est important de noter que l'effondrement, la déformation des murs et les fissurations ne sont pas forcément le résultat d'une même cause.

4. Conclusion : Définition et choix des cas d'étude

Après avoir vu et analysé les phénomènes de dégradation et d'instabilité qui menacent le patrimoine vernaculaire de la région du *Souf*, plusieurs hypothèses ont été proposées pour identifier et comprendre les causes des désordres observés. Ces derniers

sont classés selon leur nature en deux facteurs. D'abord, se trouvent les dégradations dus aux facteurs internes qui ont une relation avec le comportement de la structure elle-même (comportement des matériaux de constructions et la géométrie de la structure). Effectivement, le diagnostic préliminaire a montré que la géométrie adoptée dans la typologie des coupoles en *Rose des Sables* présente des faiblesses causant des désordres. Entre autres, l'évaluation préliminaire de la maçonnerie indique que son comportement mécanique peut être l'origine de l'émergence de dégradation. Ensuite, se trouvent les dégradations dus aux facteurs externes qui ont une relation avec les aléas naturels et anthropologiques. Les aléas naturels dans la région du *Souf* sont représentés par les conditions climatiques dures et la variation du niveau de la nappe phréatique. En effet, il a été établi que la présente architecture a subi des désordres à cause de la remonté capillaire d'eau créant de l'humidité dans la base des structures, ce qui a causé à l'effritement des matériaux composant la maçonnerie. Mais également, elle est à l'origine de l'apparition des moisissures et efflorescence. Les deux facteurs contribuent collectivement à l'apparition des dommages et dans certains cas de les aggraver.

Vu la complexité de la problématique pour réaliser un diagnostic technique à travers la définition des origines de désordres observés et l'estimation du risque d'instabilité, il est important de procéder à un diagnostic structurel détaillé, en affirmant ou en contestant les hypothèses proposées concernant les origines de dégradation. En effet, L'analyse des causes de dégradations classées dans le facteur interne font principalement l'objectif de la présente recherche, vu que les pathologies les plus observés et qui présentent un vrai danger sur ce patrimoine semble avoir des relations avec la structure elle-même et ses matériaux de construction. Afin de réaliser cette analyse de diagnostic, il est nécessaire de définir un cas d'étude pour chaque analyse. Donc, un choix se fait à la base des éléments qui ont une relation avec les dommages à savoir les matériaux de constructions et la structure vulnérable.

Pour comprendre les origines internes des désordres qui attaquent les matériaux de constructions, différentes analyses de matériaux s'avèrent nécessaires à réaliser au niveau des laboratoires. A cet effet, une collecte des échantillons de pierres en *Rose des Sables* et de mortier de gypse a été faite. Cette collecte cible les gros blocs de pierre en *Rose des Sables* et morceaux de mortier du gypse prélevés dans les maisons vernaculaire à *Guemar*, tout autant que les blocs de *Rose des Sables* avec du mortier attachés recueillis sur site dans le but d'établir des analyses comparatives. En outre, des

échantillons de la pierre originale pour produire le gypse, *Tafza*, sont pris au niveau des fours traditionnels de gypse, ainsi qu'une quantité importante du gypse en poudre est obtenue du chantier de restauration du monument historique *Zaouia Ettidjania*.

Comme il est déjà mentionné auparavant, les constructions vernaculaires font l'objet de la présente recherche, dû à leur importance dans la définition du paysage de la région. Aussi, elles ont subi des dommages importants selon le présent diagnostic, particulièrement les maisons avec des coupoles traditionnelle de la première sous-typologie, caractérisée par une hauteur basse (Supra chapitre 2). Ce choix de cas d'étude est justifié par le fait que cette sous typologie est la plus présente dans le tissu urbain de la région d'un côté, et le désordre répétitif remarqué dans plusieurs maisons de cette sous typologie d'un autre côté. Et afin de comprendre la relation entre certains désordres et la structure de cette typologie, l'analyse structurel se fait selon deux niveaux. D'abord, vu que la coupole est l'élément le plus vulnérable, des analyses au niveau d'une coupole autonome sont nécessaires pour comprendre son fonctionnement structurel. Par ailleurs, à un niveau plus grand, il est utile d'analyser le comportement structurel d'une construction traditionnelle composée de deux cellules à coupoles pour comprendre les différents dommages déjà citées. Le parcours de connaissance de la présente recherche sera complété par les résultats issus des tests expérimentaux et des analyses numériques, en permettant l'évaluation de la vulnérabilité des constructions dans le prochain chapitre (Infra Chapitre 4).

Chapitre 4 : Approche sur l'évaluation de la vulnérabilité structurelle des constructions à coupoles en *Rose des Sables*

Suite au diagnostic effectué et aux hypothèses proposées, et afin de répondre à l'origine des dégradations observées, ce parcours de connaissance a été complété par l'évaluation de la vulnérabilité des constructions. Cette dernière se fait à travers, d'abord, les différents essais expérimentaux réalisés sur des échantillons de matériaux collectés lors des enquêtes *in situ*, en laboratoires et sur site. Ensuite, les résultats des tests expérimentaux permettent à répondre à certaines hypothèses, mais seront également exploités pour la suite de l'analyse à savoir : la simulation du comportement structurel des éléments de ce type de construction. En effet, l'analyse structurelle doit être envisagée pour mettre en exergue les différents liens entre le diagnostic réalisé *in situ* et les résultats des différents essais des matériaux et la simulation des modèles. La superposition des résultats obtenus permet d'avoir une vision des origines de désordres observés dans cette architecture vernaculaire, et cela peut consentir l'étude des stratégies de sauvegarde et de sécurité.

1. Caractérisation des matériaux de construction et investigations expérimentales

A partir des échantillons de matériaux récoltés sur le site, différents essais ont été réalisés aux laboratoires, afin de déterminer leurs caractéristiques physico- chimiques et mécaniques, telles que :

_ Une analyse physique pour faire ressortir les caractéristiques physiques des matériaux des constructions à savoir la pierre de construction et le mortier.

_ Une analyse minéralogique et pétrographique, afin d'identifier les minéraux qui composent les différents matériaux de construction, ainsi que le niveau de comptabilité des matériaux entre eux.

_ Une analyse mécanique, à l'échelle de chaque matériau de construction et à l'échelle de la maçonnerie, et cela à travers différents essais mécaniques au laboratoire à savoir : les essais de compression uniaxiale, les essais de traction indirecte (brésilien), les essais de flexion trois points ; ainsi que des essais non destructifs *in situ* sur le mortier et le plâtre par le biais d'un pénétromètre.

a) Méthodologies d'échantillonnage et d'analyse

Plusieurs échantillons ont été prélevés dans les bâtiments à Guemar (Figure 92.a), en faisant sortir leurs données (dimensions, poids...), (Figure 92.b). Les échantillons sélectionnés pour l'analyse de chaque matériau sont catalogués comme suit :

_ DR1, DR2 et DR3 sont constitués de pierre de *Rose des Sables*, comme matériau constituant à la fois la maçonnerie des murs et des coupoles (Figure 93.a, b &c) avec quelques résidus de mortier de jointoiment prélevés sur des bâtiments endommagés (Figure 93.d). Il est important de noter que le DR1 est le plus grand échantillon par rapport à sa masse qui est de 30 Kg ;

_ TS, *Tafza*, est la pierre utilisée pour produire la poudre du liant (Figure 93.e) ;

_ MP, est un mortier de jointoiment prélevé dans les mêmes bâtiments (Figure 93.f).

Les analyses physiques, minéralogiques et pétrographique suivantes ont été réalisées en laboratoire⁵ uniquement sur les échantillons DR3 ; TS et MP.



Figure 92. a. Échantillons des pierres en *Rose des Sables* (l'auteure, 2018). b. Élaboration des données des échantillons (l'auteure, 2018).

⁵ Les essais sont fait sous la direction du docteur Fabio Fratini, au niveau des laboratoire de CNR « Institut des sciences du patrimoine, Conseil national de la recherche », Florence, Italie



Figure 93. Échantillons constitués des pierres de la Rose des Sables sélectionnées et cataloguées comme suit : a. Échantillon DR1 ; b. Échantillon DR2 ; et c. Échantillon DR3. d. Échantillon de pierre de la Rose des Sables avec résidus de mortier prélevés sur des bâtiments endommagés. e. Échantillon TS, Tafza, la pierre utilisée pour produire le mortier. f. Échantillon MP, le mortier de jointement prélevé. (l'auteure, 2018).

***b) Caractérisation physique et chimique (minéralogique et pétrographique)
des matériaux***

1. Caractérisation physique

Concernant la caractérisation physique, la densité apparente a été évaluée en mesurant le poids sec à 60 ° C, divisé par la valeur du volume apparent. La masse volumique apparente a été déterminée en plongeant l'échantillon dans le mercure et en mesurant la variation de niveau qui correspond au volume apparent. Pour effectuer cette mesure, un pycnomètre Hg de Chandler Engineering a été utilisé.

La densité apparente des échantillons DR3, TS et MP a été déterminée par pycnomètre Hg et les résultats sont rapportés dans le tableau 4. Pour l'échantillon DR3, l'évaluation de la densité a été sélective en prenant soin de séparer le mortier de jointoiment. Quant aux échantillons DR3 (environ 2,22 g / cm³), considérant qu'ils sont constitués presque dans la même quantité de gypse et de quartz qui a une densité de 2,66 et sa porosité d'environ 10%. Quant à la masse volumique apparente des échantillons TS (environ 1,55 g / cm³), considérant qu'elle est constituée principalement de gypse d'une densité de 2,3 g / cm³, et sa porosité d'environ 3%. Quant à la masse volumique apparente des échantillons MP (environ 1,42 g / cm³), étant donné qu'également, dans ce cas, il est principalement constitué de gypse, et sa porosité est d'environ 38%.

Echantillons	Spécimens	Poids sec (g)	Volume apparent (cm ³)	Masse volumique en vrac γ (g/cm ³)
TS	TS-1	8.46	5.47	1.55
	TS-2	8.30	5.40	1.54
	TS-3	9.34	5.91	1.58
	<i>Valeur moyenne</i>	8.70	5.59	1.55
	<i>Écart-type</i>	0.56	0.28	0.02
	<i>Coefficient de variation</i>	0.06	0.05	0.01
DR3	DR3-1	8.53	3.70	2.30
	DR3-2	9.73	4.40	2.21
	DR3-3	8.54	4.01	2.13
	<i>Valeur moyenne</i>	8.93	4.04	2.22
	<i>Écart-type</i>	0.69	0.35	0.09
	<i>Coefficient de variation</i>	0.08	0.09	0.04
MP	MP-1	8.80	6.26	1.41
	MP-2	7.31	5.12	1.43
	MP-3	8.05	5.60	1.44
	<i>Valeur moyenne</i>	8.05	5.66	1.42
	<i>Écart-type</i>	0.74	0.57	0.02
	<i>Coefficient de variation</i>	0.09	0.10	0.01

Tableau 4. Résultats des tests physiques effectués par pycnomètre Hg (l'auteure).

Avant d'effectuer les essais mécaniques sur les échantillons DR1 (5 spécimens) et DR2 (5 spécimens), caractérisés par une forme géométrique régulière, la masse volumique apparente a été estimée en mesurant le poids sec à 60 ° C et en calculant la valeur du volume apparent (produit de la taille des bords de l'échantillon). Les valeurs moyennes obtenues sont légèrement inférieures aux valeurs mentionnées dans le tableau 5 déterminées pour les échantillons DR3 par pycnomètre Hg, une procédure plus fiable. Il est possible d'observer qu'en considérant les valeurs moyennes de la

densité apparente de tous les échantillons DR, le coefficient de variation n'est que de 5%.

2. Caractérisation chimique

En ce qui concerne la caractérisation chimique, elle a d'abord porté sur la détermination de la composition minéralogique principale. Elle a été exécutée par diffraction des rayons X (XRD) (diffractomètre X'Pert par PANalytical avec anticathode Cu) selon les conditions opératoires suivantes : $2\theta = 3-70$, temps par pas = 60,325 sec, taille de pas = 0,033, 40 KV, 30 mA. Les échantillons ont été broyés dans un mortier d'agate, afin d'obtenir une poudre granulométrique suffisamment fine, apte à la réalisation de l'analyse selon la méthode des poudres. Ensuite, une étude pétrographique par observations sur lames minces au microscope optique en lumière polarisée transmise (microscope Zeiss AXIO Scope.A1) a été accomplie, en appliquant la procédure suivante : les échantillons ont été incorporés dans de la résine, puis ils ont été lissés selon la coupe à observer, ils étaient ensuite collés sur une lame de verre. À ce niveau, sur le côté opposé de la lame de verre, l'échantillon a été abrasé jusqu'à une épaisseur d'environ 100 μm et ensuite lissé avec un émeri de 1200 grains jusqu'à une épaisseur de 30 μm .

Passant aux résultats de l'analyse chimique pour chaque échantillon cité, dont les résultats de l'analyse minéralogique sont présentés par des spectres XRD d'échantillon (Figure 94.a, 95.a&b et 96.a), tandis que les résultats de l'étude pétrographique sont rapportés sur des images des coupes transversales des échantillons (Figure 94.b, 95.c et 96.b) et des coupes minces obtenues par le microscope optique en lumière polarisée transmise (Figure 94.c, 95.d et 96.c&d). En premier lieu, l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X montre que la pierre de *Tafza* (TS) - la pierre utilisée pour produire le liant en poudre pour mortiers - est constitué principalement de gypse et secondairement de quartz, epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), calcite, bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) et anhydrite (CaSO_4). Quant à la pierre de la *Rose des Sables* (DR3), l'analyse minéralogique a été sélective en prenant soin de séparer le mortier d'assise. Les résultats montrent qu'il est constitué de gypse, de quartz et d'impuretés d'epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) et de calcite (Figure 94.a). Regardant le résultat pétrographique de la pierre de *Tafza*, échantillon TS, se révèle constituée de fléaux micritiques et microsparitiques composés d'un mélange de gypse et de calcite avec une petite quantité de quartz,

epsomite, bassanite, anhydrite (Figure 94.b&c, coupe transversale et coupe mince respectivement).

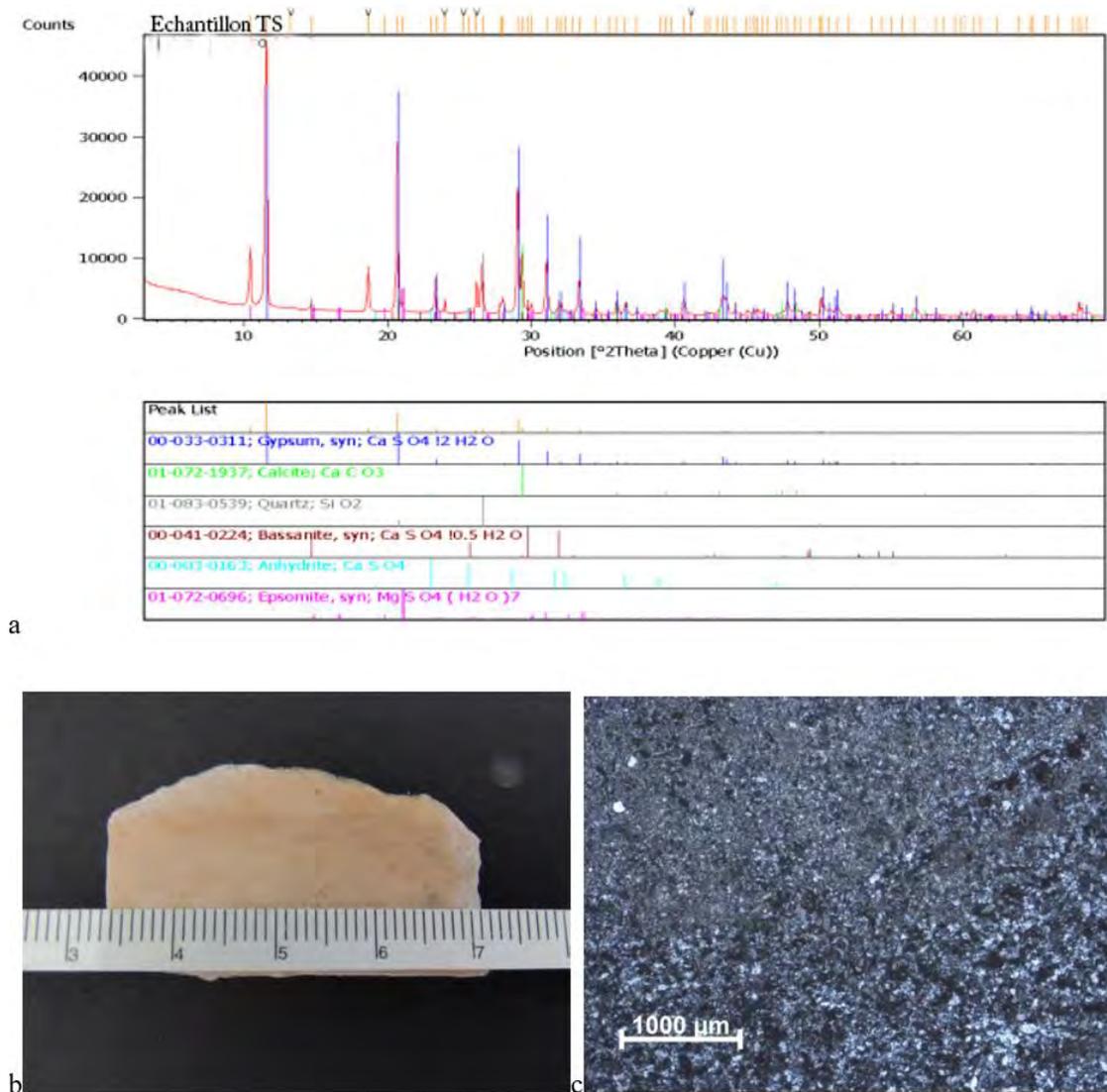


Figure 94. Résultats minéralogiques et pétrographiques de l'échantillon TS, la pierre de Tafza : a. Spectre XRD. b. Coupe transversale de l'échantillon. c. Image en coupe mince de l'échantillon observée au microscope optique en lumière transmise polarisée (Azil Cheima, Fratini Fabio).

Ensuite, les résultats minéralogiques et pétrographiques de l'échantillon DR3, composé d'environ 50% de pierre *Rose des Sables* et 50% de mortier, démontrent la parfaite cohésion entre les deux matériaux. Cette cohésion permet la construction d'éléments structurels (murs et coupes) avec des blocs de pierre très irréguliers et garantit la résistance et la stabilité, qui autrement seraient difficilement atteintes sans blocs carrés et texture régulière. En particulier, Les spectres XRD de l'échantillon montrent que les cristaux de gypse, à savoir la pierre de la *Rose des Sables*, (Figure 95.a) et le mortier (Figure 95.b) à la base sont constitués de gypse et avec des impuretés : de quartz, epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), calcite, bassanite ($CaSO_4 \cdot 0,5$

H₂O), et anhydrite (CaSO₄). Le mortier montre également la présence de dolomite et de polyhalite [K₂Ca₂Mg (SO₄)₄ • 12H₂O]. Également grâce à l'analyse pétrographique, en bas à gauche dans la figure 95.c, des cristaux de gypse (Pierre de la Rose des Sables) peuvent être observés tandis que le mortier de jointoiment en haut à droite est omniprésent. Concernant les cristaux *_ Rose des Sables _* : chaque cristal de gypse comprend une grande quantité de grains de quartz et de calcite arrondis avec une distribution unimodale (dimensions 200-300 µm), (Figure 95.d).

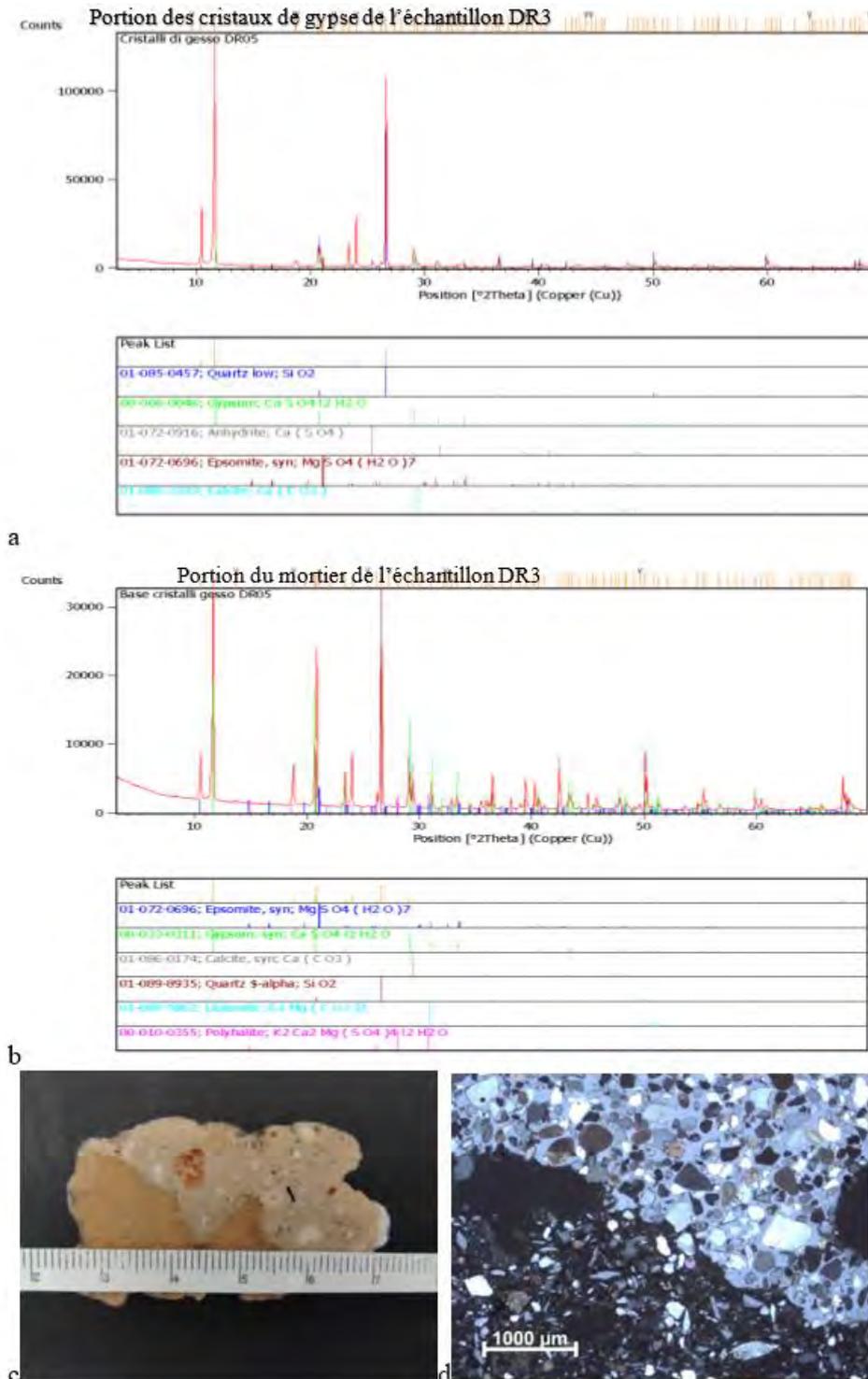


Figure 95. Résultats minéralogiques et pétrographiques de l'échantillon DR3, pierre de la Rose des Sables avec le mortier : a. Spectre XRD de l'échantillon DR 3-portion avec des cristaux de gypse (la Rose des Sables). b. Spectre XRD de l'échantillon DR3-portion avec mortier. c. Coupe transversale de l'échantillon DR3 : en bas à gauche le cristal de gypse (Rose des Sables), en haut à droite le mortier. d. Image en coupe mince observée au microscope optique en lumière transmise polarisée. En bas se trouve le mortier, en haut le cristal de gypse qui comprend des grains arrondis de quartz et de calcite (Azil Cheima et Fratini Fabio).

L'analyse minéralogique du mortier, l'échantillon MP, montre qu'il est constitué principalement de gypse et secondairement de dolomite, epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$),

calcite, bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{ H}_2\text{O}$), anhydrite (CaSO_4) et polyhalite [$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$] (Figure 96.a). Comme l'ont déjà mis en évidence les informations géologiques sur la zone d'étude (Supra Chapitre 2), les résultats de l'analyse minéralogique montrent que les matériaux de construction, les blocs et le mortier, partagent dans la composition minéralogique le composant dominant, le gypse. Selon l'analyse pétrographique, l'échantillon MP de mortier est constitué d'un liant de gypse microsparitique et d'agrégats constitués de grains de quartz angulaires dominants (dimensions 200-300 μm), secondairement par des grains de calcite micritique (dimensions 200-300 μm) et des fragments de roche de gypse (dimensions 1-3 mm). Le rapport liant /agrégat est d'environ 1/3 selon la comparaison avec les tableaux qualifiés (Zezza, 1976). La section transversale de l'échantillon MP est indiquée sur la figure 96.b et la section mince sur les figures 96.c&d. Enfin, il est possible d'observer que l'échantillon MP a les mêmes caractéristiques que le mortier présent dans l'échantillon DR3.

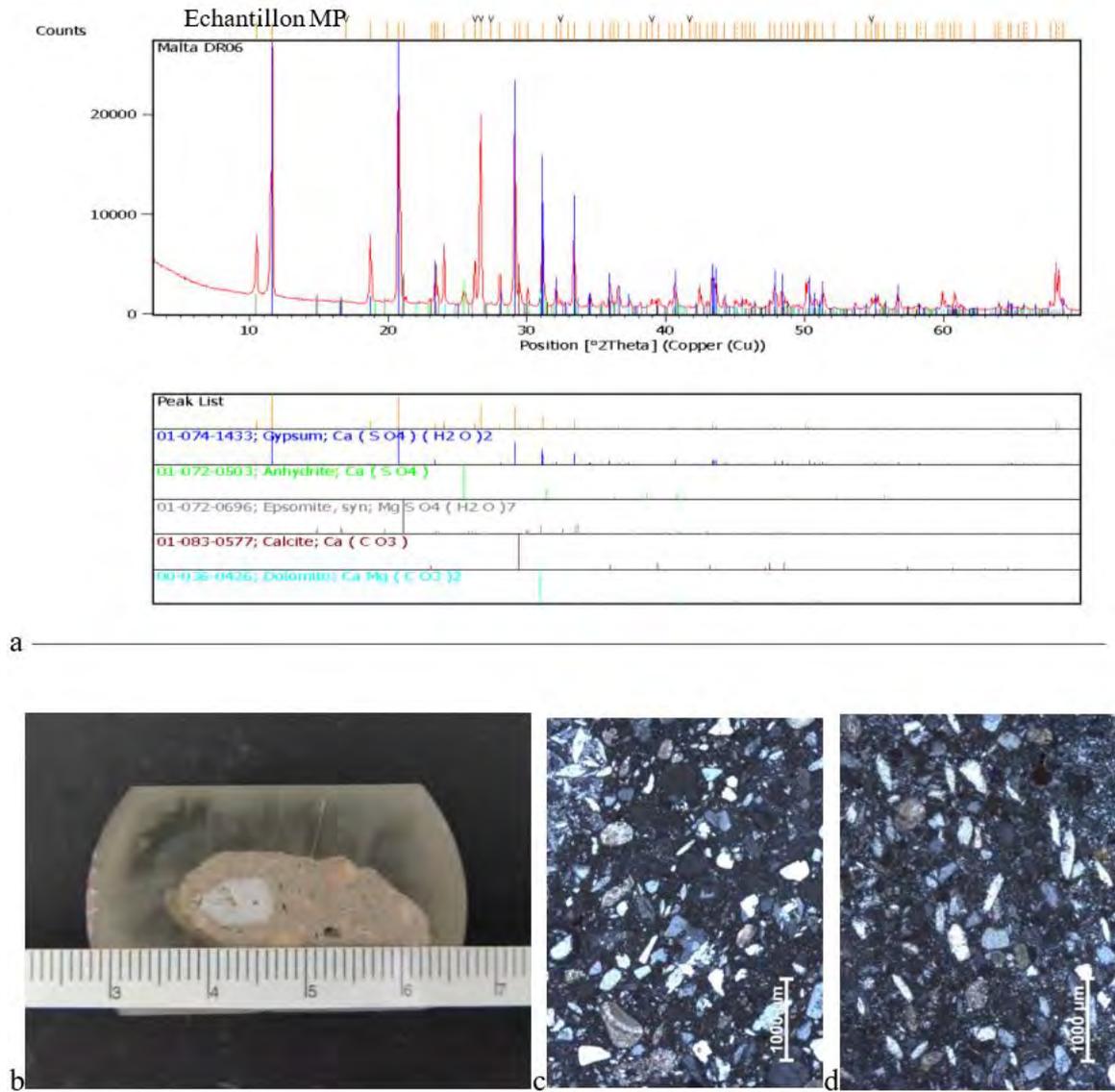


Figure 96. Résultats minéralogiques et pétrographiques de l'échantillon MP, le mortier : a. Spectre XRD de l'échantillon Spectre XRD. b. Coupe transversale de l'échantillon. c & d. Images en coupe mince de l'échantillon observée au microscope optique en lumière transmise polarisée (Azil Cheima et Fabio Fratini).

c) Analyse mécanique des matériaux

1. Les composants de la maçonnerie

Sur les échantillons DR1 et DR2, des tests mécaniques ont été réalisés au laboratoire, afin de déterminer les paramètres mécaniques de la pierre de *Rose des Sables*. À cet effet, les échantillons DR1 et DR2 ont été découpés pour obtenir 13 éprouvettes de forme cubique, afin de réaliser des essais de compression uniaxiale et des essais de traction indirecte (essai brésilien ou essai de fractionnement), Figure 97. Les critères de choix de la forme (cubique) et la taille (50 mm) des échantillons découlent du nombre limité de blocs de pierre disponibles et de leur irrégularité géométrique et de leurs tailles limitées. Cependant, afin de garantir une certaine homogénéité macroscopique parmi la quasi-totalité des échantillons, seuls les échantillons dont les inhomogénéités n'étaient pas supérieures à au moins un cinquième de la taille la plus petite ont été considérés (UNI EN, 1926). En particulier, cinq spécimens - de S1-DR1 à S5-DR1, obtenus à partir de l'échantillon DR1 - et cinq spécimens - de S6-DR2 à S10-DR2, obtenus à partir de l'échantillon DR2 - ont été soumis à l'essai de compression uniaxiale. Trois spécimens - S11-DR1, S12-DR1 et S13-DR1, obtenus à partir de l'échantillon DR1 - ont été soumis à l'essai de traction indirecte (Figure 97).

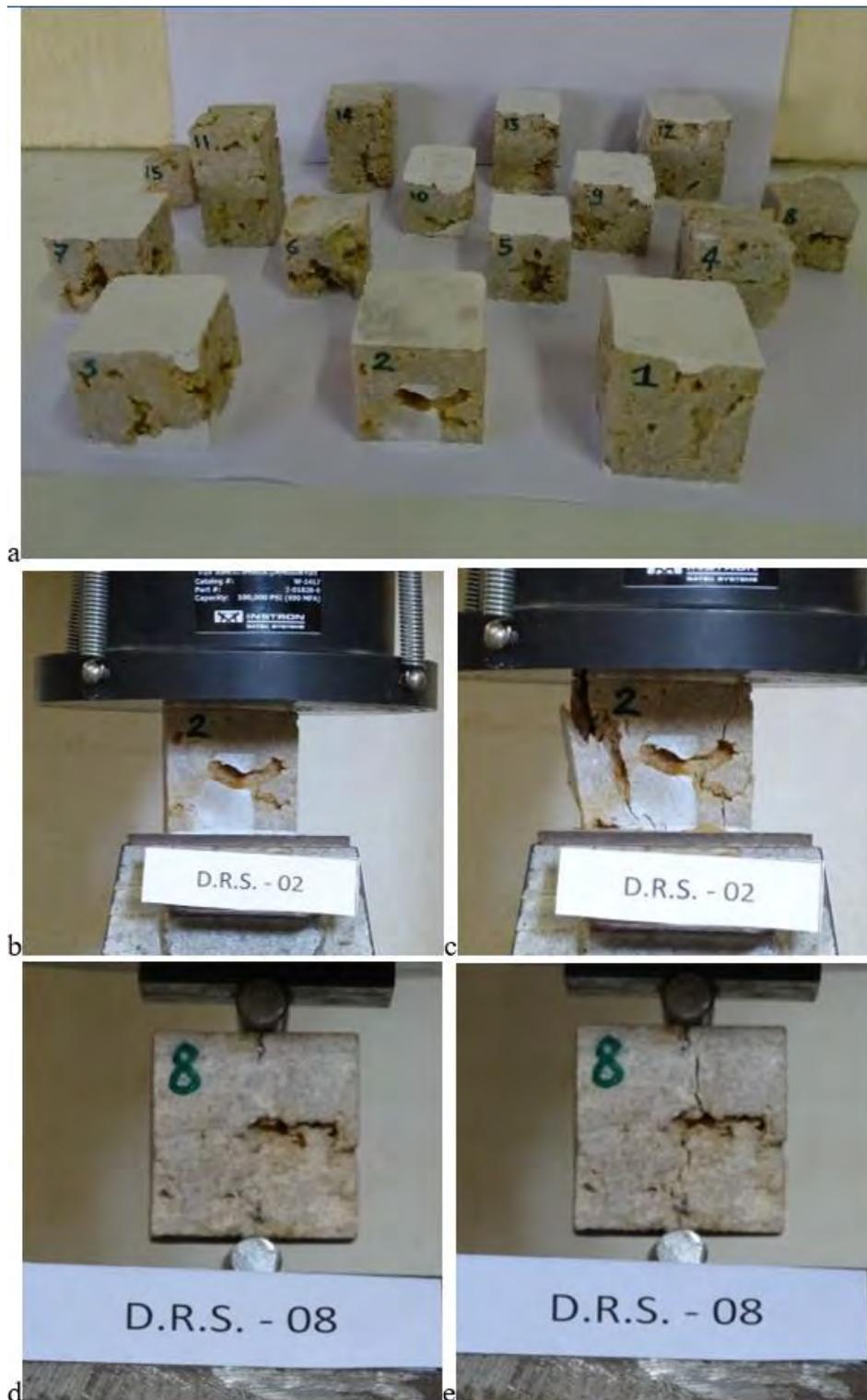


Figure 97. a. Échantillons obtenus par découpe d'échantillons DR1 et DR2, pour les essais de compression uniaxiale et les essais de traction indirecte ; b & c. Éssai de compression uniaxiale sur un spécimen représentatif ; d & e. Éssai de traction indirecte sur un spécimen représentatif, (l'auteure, 2018).

Les surfaces supérieures et inférieures des échantillons ont été recouvertes d'une suspension de gypse pour régulariser et permettre l'application d'un champ de contraintes uniforme pendant les essais, surtout que la pierre de la *Rose des Sables* est caractérisée par sa porosité élevée (Figure 98). L'appareil pour les essais est constitué d'une presse mécanique équipée d'une cellule de pesée 20KN reliée à un système d'acquisition (enregistreur de données TDS) traçant tout le trajet d'équilibre, donc en contrôle des déplacements, avec un intervalle d'échantillonnage de 0,02 mm. Le déplacement global vertical a été acquis par un transformateur différentiel variable linéaire intégré dans la machine d'essai avec une résolution de 1 μm .



Figure 98. Spécimen avec des surfaces recouvertes d'une suspension de gypse, montrant aussi la porosité de la pierre de la *Rose des Sables*, (l'auteure, 2018).

Concernant les essais de compression uniaxiale, des diagrammes contrainte-déformation ont été enregistrés, et les paramètres suivants ont été déterminés : la contrainte de compression σ_c , le module d'élasticité E , la ductilité cinématique μ_c , et la ductilité cinématique disponible μ_{cd} . La ductilité cinématique représente la capacité du matériau à résister à la déformation et donc à dissiper de l'énergie après la phase élastique linéaire et avant d'atteindre la contrainte ultime. La ductilité cinématique disponible représente la capacité de déformation après la contrainte maximale. Le module d'élasticité est calculé en considérant la tangente à la branche linéaire contrainte-déformation avant le pic (30% - 70% de la charge de pointe).

En ce qui concerne les essais de traction indirecte, des spécimens parallélépipédiques ont été utilisés, au lieu de cylindriques, pour réaliser des sections linéaires plus simples. Considérant un cylindre inscrit dans le spécimen parallélépipédique, la section circulaire verticale droite est comprimée par une charge

concentrée en deux points antipodaux. Ainsi, la contrainte de traction se développe dans la direction perpendiculaire à la charge. Par l'hypothèse d'un matériau homogène, isotrope, élastique, au centre géométrique de la section circulaire, le rapport de compression sur contrainte de traction est de -3, et la contrainte de rupture en traction est à peu près la même que la contrainte de rupture en traction uniaxiale. Conformément à (ASTMD3967-16, 2016), la résistance à la traction est déterminée en considérant la formulation suivante : $f_t = \frac{2F}{\pi A}$, où F est la charge de rupture et A est la surface du cercle inscrit dans la section verticale carrée sous la charge. L'utilisation du parallélépipède au lieu de la forme cylindrique de l'échantillon est une approximation due à la difficulté de découper les échantillons. On constate que la déformation (et donc la contrainte) à laquelle est soumis l'échantillon parallélépipédique dans la partie sous l'application de la charge pendant l'essai, ne diffère raisonnablement pas beaucoup de celle subie par le cylindre virtuel enfermé, qui a évidemment été utilisé pour calculer la résistance à la traction. En fait, l'échantillon est en contact avec la machine de test uniquement là où la charge est appliquée (points du cylindre virtuel), tandis que le reste de la surface externe est libre.

Les résultats des tests de compression (Tableau 5) montrent que les échantillons DR1 et DR2 ont des propriétés mécaniques différentes (Figure 99). Les spécimens de *Rose des Sables* étiquetés DR1 ont une résistance à la compression ($\sigma_c = 18,4$ MPa) et un module d'élasticité ($E = 3647$ MPa) supérieurs à ceux du DR2 ($\sigma_c = 6,3$ MPa et $E = 649$ MPa), Figure 99. Concernant la ductilité cinématique, les éprouvettes DR1 présentent des valeurs plus faibles ($\mu_k = 1,29$) que les éprouvettes DR2 ($\mu_k = 1,43$), tandis que la ductilité cinématique disponible est approximativement la même. En particulier, la résistance à la compression de l'échantillon DR2 est d'environ 34% de celle de l'échantillon DR1 et le module d'élasticité de DR2 est d'environ 20%. La dispersion entre les valeurs, et donc leur représentativité, sont clairement liées également au nombre réduit de spécimens disponibles. Cependant, ces résultats étaient corrélés aux valeurs de densité apparente, soulignant que l'augmentation de la densité apparente est liée à de meilleures propriétés mécaniques. À leur tour, les différences de densité apparente sont corrélées à la porosité. Même la ductilité plus élevée des échantillons DR2 était corrélée à la porosité. En fait, une capacité élevée d'un matériau à se déformer avant d'atteindre la charge maximale est typique des matériaux poreux,

appelés compacteurs (Briccoli Bati et al., 2001), qui peuvent remplir leurs pores pendant le processus de déformation.

Echantillon	Spécimens	Dimensions (mm)			Masse volumique en vrac γ (g/cm ³)	Résistance à la compression σ_c (Mpa)	Module d'élasticité apparent E (Mpa)	Ductilité cinématique μ_c	Ductilité cinématique disponible μ_{cd}
		a	b	h					
DR1	S1-DR1	51.6	52.3	59.4	2.19	21.45	3760.31	1.11	1.43
	S2-DR1	51	51.6	52.3	2.03	14.80	1489.78	1.16	1.57
	S3-DR1	51	51	51.6	2.17	21.56	2535.66	1.45	1.56
	S4-DR1	40.9	41.2	75.5	2.39	16.63	4634.67	1.31	1.92
	S5-DR1	46.1	47.2	62.2	1.93	17.76	5817.37	1.40	1.64
	<i>Valeur Moyenne</i>				2.142	18.44	3647.56	1.29	1.63
	<i>Écart-type</i>				0.175	2.99	1702.02	0.15	0.18
<i>Coefficient de variation</i>				0.08	0.16	0.47	0.11	0.11	
DR2	S6-DR2	46.9	46	47.7	2.10	4.04	409.40	2.40	1.33
	S7-DR2	41.4	41.2	42.2	1.83	4.62	409.04	1.54	1.49
	S8-DR2	48.2	46.2	47.4	1.88	9.58	1007.31	1.09	1.33
	S9-DR2	44.7	44.2	44.9	2.02	8.97	576.52	1.25	1.35
	S10-DR2	42.5	42.8	63.8	1.98	4.37	1031.92	0.84	1.66
	<i>Valeur Moyenne</i>				1.96	6.32	649.88	1.43	1.44
	<i>Écart-type</i>				0.11	2.72	268.26	0.60	0.14
<i>Coefficient de variation</i>				0.06	0.43	0.41	0.42	0.10	

Tableau 5. Résultats des tests de compression uniaxiale pour les échantillons DR1 et DR2 (l'auteure).

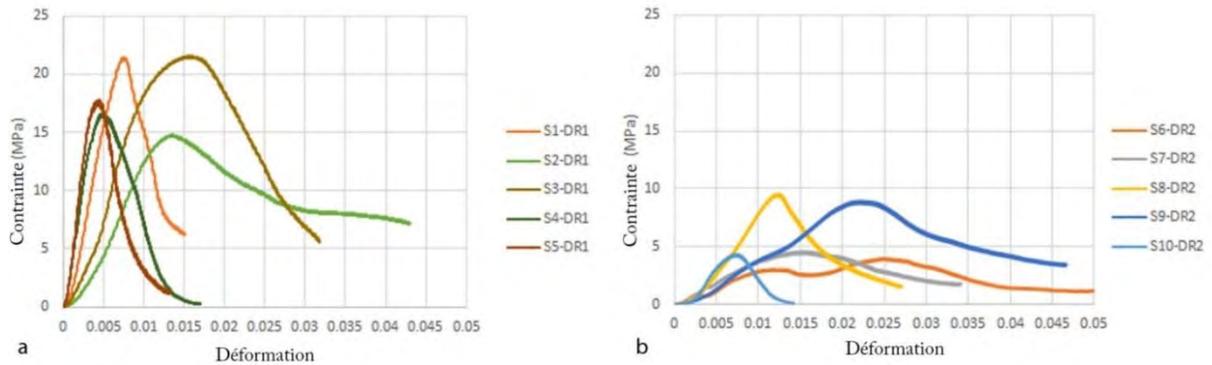


Figure 99. Diagrammes contrainte-déformation enregistrés lors des essais de compression uniaxiale : a) Échantillons obtenus à partir de l'échantillon DR1 ; b) Échantillons obtenus à partir de l'échantillon DR2, (l'auteure).

Il est important de souligner que les résultats obtenus sur le module d'élasticité, du fait de la forme cubique des éprouvettes et de la méthode d'essai (mesures globales), sont sous-estimés. En effet, on sait que la comparaison entre les résultats des déformations globales sur l'échantillon cubique et les mesures locales sur l'échantillon parallélépipédique montre que les globales sont plus élevées en raison du contact entre les plaques de l'appareil d'essai et les éprouvettes. Une autre raison de sous-estimation du module élastique peut être liée également aux phénomènes de microfissuration qui auraient pu se produire avant d'atteindre 70% de la résistance à la compression comme cela se produit souvent pour les roches naturelles. Cependant, pour les échantillons testés, la branche ascendante linéaire était claire pour la gamme de valeurs considérée.

Comme pour le test brésilien, les échantillons n'ont toujours pas montré de plans de fracture verticaux et distincts sous les charges appliquées permettant de valider la qualité des résultats obtenus (Figure 97.e). En effet, la fracture verticale indique que la contrainte induite lors de l'essai est conforme au modèle analytique adopté pour le calcul de la résistance à la traction. Pour les échantillons DR1, la résistance à la traction a été trouvée égale à 0,91 Mpa (tableau 6), correspondant à environ 1/20 de la résistance à la compression.

Echantillon	Spécimens	Dimensions (mm)			Masse volumique en vrac γ (g/cm ³)	Résistance à la traction σ_t (Mpa)
		a	b	h		
DR1	S11-DR1	41.6	40.9	42	2,19	0,96
	S12-DR1	40.6	41.2	41.2	1,93	0,79
	S13-DR1	41.3	41.5	42.6	2,57	0,99
	<i>Valeur Moyenne</i>				2,23	0,91
	<i>Écart-type</i>				0,32	0,11
	<i>Coefficient de variation</i>				0,14	0,12

Tableau 6. Résultats de l'essai de traction indirecte (l'auteure).

Le rapport 1/20 entre les résistances à la traction et à la compression se situe dans la gamme typique des matériaux de maçonnerie, naturels et artificiels : 1/15 - 1/40 avec un mode autour de 1/30. Le ratio 1/20 a également été trouvé dans la littérature pour les briques artisanales de faible qualité et la pierre de tuf dans différents contextes de construction (Alecci et al., 2016; Drougkas et al., 2016; Grande & Romano, 2013; Marcari et al., 2007; Matysek & Witkowski, 2016; Shu et al., 2017) .

Dans l'ensemble, il est possible d'observer que la pierre analysée présente une hétérogénéité remarquable, visible macroscopiquement, due à la fois à la porosité, qui se manifeste par des pores de dimensions variables (jusqu'à 1,5 cm) et de concentrations différentes et à la structure macroscopique avec l'agrégat typique de cristaux aplatis, plus fins aux extrémités, qui ressemblent à des pétales de rose. Ce fait justifie les différences entre les résultats obtenus pour les échantillons DR1 et DR2 (Figure 99 et Tableau 5).

Cependant, on peut observer que les propriétés du matériau sont proches de celles d'un *Tuf* de bonne qualité (del Zoppo et al., 2019; Grande & Romano, 2013; López-Doncel et al., 2013; Marcari et al., 2007) et des briques artisanales de qualité moyenne, (López-Doncel et al., 2013). En particulier, la pierre de la *Rose des Sables* partage, avec les pierres de *Tuf*, des propriétés mécaniques qui ne sont pas élevées et étroitement liées à la densité apparente et à la porosité, en accord avec (Lourenco et al., 2010) .Aussi, dans (Lourenco et al., 2010) les paramètres mécaniques des briques

artisanales, nouvelles et anciennes, présentent des analogies avec ceux obtenus pour la pierre de *Rose des Sables*, à la fois en termes de valeurs et de dépendance aux propriétés physiques.

Il convient de noter que les échantillons soumis à des tests de compression et de traction indirecte ont montré des surfaces très irrégulières en raison de la présence d'une porosité étendue et irrégulière, cette hétérogénéité aurait pu être en quelque sorte atténuée si des échantillons de plus grande taille avaient été utilisés (Figure 97 &98). Cependant, la taille des blocs de pierre prélevés *in situ* et l'opération de découpe n'ont pas permis de réaliser des échantillons plus importants. On peut également observer que, malgré le nombre limité d'éprouvettes, les valeurs de dispersion obtenues sont en ligne avec celles généralement obtenues pour les matériaux de maçonnerie naturels, qui présentent une hétérogénéité, une anisotropie et une porosité variable.

Concernant le mortier de gypse, des essais par pénétromètre ont été effectuées *in situ* sur le mortier de plusieurs murs (Figure 100). Le test de pénétration du mortier de la maçonnerie historique présenté dans cette étude est basé sur le principe de la pénétration, et le résultat du test est la charge de pénétration en fonction de la profondeur de pénétration (PEZZI, 2002). De ce fait, pour chaque échantillon (mortier de la maçonnerie) plusieurs pénétrations ont été effectuées. Selon le manuel de calcul des résultats obtenus par le pénétromètre (PEZZI, 2002), seulement les valeurs de pénétration qui ont plus ou moins de 25% de leur valeur moyenne ont été sélectionnées. La valeur moyenne des valeurs sélectionnées est calculée pour déterminer la résistance du mortier F_m en considérant la formulation suivante : $F_m = \frac{1}{13} M$, où M est la valeur moyenne ses valeurs sélectionnées et $\frac{1}{13}$ est le coefficient sélectionné à partir de la courbe d'étalonnage pour mortier (PEZZI, 2002), vu que les valeurs moyennes sont inférieures à 500. Les résultats des essais par pénétromètres sont reportés dans le tableau 4.4.



Figure 100. a & b. Tests par pénétromètre pour le mortier de gypse de la maçonnerie en Rose des Sables, (Cheima Azil et Luisa Rovero, 2019).

Échantillon	Valeur Moyenne des valeurs sélectionnées Pg	Résistance F_m (Mpa)
Échantillon 1	385	2.9
Échantillon 2	398	2.6
Échantillon 3	340	2.7
Échantillon 4	397	3.2
<i>Valeur Moyenne</i>		2.8
<i>Écart-type</i>		0.22
<i>Coefficient de variation</i>		0.08

Tableau 7. Résultats des tests par pénétromètre pour le mortier de gypse (l'auteure)

Les résultats montrent que la résistance à la compression du mortier de gypse est égale à 2,8 MPa. Cette valeur est bien inférieure aux valeurs de la littérature pour les mortiers de gypse, qui présentent une résistance encore 10 fois supérieure et des valeurs typiques entre 10 et 22 MPa (Igea Romera et al., 2013; Moayedian & Hejazi, 2021; Shiroma et al., 2016; Sidek et al., 2017; Vegas et al., 2011). La raison de cette faible résistance peut être liée à la procédure traditionnelle de préparation et de cuisson de la poudre de gypse et aux caractéristiques de la pierre de plâtre utilisée.

Compte tenu de la résistance à la compression d'un mortier, il est possible d'obtenir une estimation du module d'élasticité. De nombreuses formulations, également incluses dans de codes techniques, sont disponibles pour le béton, sur la base des nombreuses données expérimentales disponibles. Comme ne se retrouvent pas d'études spécifiques sur les mortiers de gypse dans la littérature, une estimation très approximative a été

faite en considérant une relation résistance à la compression f_c - module d'élasticité E de type $E = A f_c^{0,5}$, proposant une formulation typique pour béton et calibrant la constante A en utilisant les quelques données disponibles dans la littérature sur les mortiers de gypse à faible résistance à la compression (Doleželová et al., 2018; Moayedian & Hejazi, 2021; Plachy et al., 2009) . De cette manière, la relation $E = 520 f_c^{0,5}$ a été considérée et le module d'élasticité apparent $E = 870$ MPa a été évalué.

2. La maçonnerie

▪ Préparation des échantillons

Passant aux tests mécaniques à l'échelle de la maçonnerie, pour cela, un travail de laboratoire a été fait pour créer des échantillons de maçonnerie en *Rose des Sables*, en utilisant les blocs de pierre déjà collectés (Figure 92), de plus, la poudre de gypse prise du chantier de restauration du monument historique de la région *Zaouia Ettidjania* pour le mortier (Figure 101). Dès lors, pour obtenir une estimation de la résistance à la traction et à la compression de la maçonnerie *Rose des Sables*, des échantillons pour effectuer l'essai de flexion trois points ont été réalisés. Ainsi, à partir des restes obtenus après l'essai de flexion trois points, des essais de compression uniaxiale sur échantillons cubiques et des essais de traction indirecte (brésilien) sur des échantillons cylindriques ont été réalisés. Ces derniers ont été obtenus à l'aide d'une carotteuse.



Figure 101. Poudre de gypse dans le site de restauration du monument historique *Zaouia Ettidjania* (l'auteure, 2019).

Le choix de la taille de l'échantillon a été influencé par la quantité et la taille des blocs de pierre disponibles. En utilisant les blocs plus grands, les échantillons de maçonnerie obtenus peuvent être considérés sur une échelle de 1 : 2 (échantillon M 1, échantillon M 2, échantillon M3). En utilisant les petits morceaux de pierre restants, la maçonnerie à une échelle de 1 : 5 (échantillon M'1, échantillon M'2, échantillon M'3) a été simulée. De cette manière, seulement trois échantillons pour chaque échelle ont été réalisés, en utilisant des coffrages de dimensions $34 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (Figure 102). Evidemment, le matériau réalisé est très hétérogène, et les résultats expérimentaux

obtenus sont conditionnés par des effets de taille, liés à la relation entre la plus grande dimension de l'hétérogénéité et les dimensions de l'échantillon.



Figure 102. Bloc de coffrage de forme parallélépipédique, dimensions 34x10x10 cm³, (l'auteure, 2020).

Selon les techniques de construction traditionnelles de maçonnerie en pierre de la *Rose des Sables*, observées *in situ* et décrites par les maçons interrogés, les échantillons de maçonnerie ont été conçus en considérant qu'ils sont constitués de 50% du volume de blocs de pierre et 50% du volume de mortier de gypse. Dans le but de transformer le rapport entre le volume en rapport entre les poids pour faciliter la réalisation des échantillons en laboratoire, les travaux ont débuté avec une estimation du poids de pierre et de mortier nécessaire dans chaque échantillon. Ainsi, étant donné que le volume de l'échantillon est de 3350 cm³, le volume de chaque matériau constituant serait approximativement la moitié de ce volume. D'après les résultats des tests physiques, la densité de la pierre *Rose des Sables* γ_{DR} est de 1,96 g / cm³ (Tableau 5), et la densité du mortier de gypse γ_m est de 1,4 g / cm³ (Tableau 4). Ensuite, pour chaque échantillon, le poids de la pierre *Rose des Sables* nécessaire est estimé à 3283g, tandis que le poids du mortier pourrait être de 2345g. Il est important à noter que la densité de la pierre choisie est celle des échantillons DR2 (Tableau 5), vu que les pierres utilisées pour les échantillons des maçonneries sont similaires à celle-ci.

Concernant les échantillons M à l'échelle 1 : 2, des blocs irréguliers d'environ 13x9x6 cm (longueur, largeur, hauteur) ont été utilisés. Les blocs de pierre sont mis dans le coffrage après la mise en œuvre d'une couche importante de gypse, puis de petits morceaux de pierre seront introduits pour combler le vide entre les plus grosses pierres, puis une couche de gypse est ajoutée, en continuant ce processus jusqu'au coffrage est rempli (Figure 103). En ce qui concerne le mortier de gypse, trois parties du liant de

gypse ont été mélangées à deux parties d'eau conformément aux indications fournies par les maçons interrogés lors de la visite du site de restauration de *Zaouia Ettidjania* à *Guemar, Souf* (Supra chapitre 2).



Figure 103. Étapes de préparation de l'échantillon M de la maçonnerie en *Rose des Sables* à l'échelle 1 : 2 dans le coffrage (l'auteure, 2020).

En ce qui concerne les échantillons M' à l'échelle 1 : 5, la même procédure de fabrication a été utilisée, en utilisant des blocs irréguliers plus petits, avec des dimensions d'environ 7x4x2 cm (longueur, largeur, hauteur), (Figure 104). Dans le tableau 8, les poids et les volumes de l'élément de maçonnerie (bloc de *Rose des Sables* et mortier de gypse) utilisés pour les échantillons M et M' sont indiqués. Pour chaque échantillon, le poids des blocs de pierre a été mesuré avant la réalisation des échantillons, tandis que le poids du mortier employé a été calculé en soustrayant le poids des blocs de pierre utilisés du poids de l'échantillon mûri après 130 jours.



Figure 104. Étapes de préparation d'échantillon de maçonnerie en Rose des Sables M' à l'échelle 1: 5 dans le coffrage (l'auteure, 2020).

Echantillon		Blocs de Rose des Sables			Mortier			% du volume vide	Le poids total (g)
		Poids (g)	Volume (cm ³)	% du volume	Poids (g)	Volume (cm ³)	% du volume		
Échantillons de maçonnerie à l'échelle 1: 2	M1	2807	1469	43,87	2394	1686	50,33	5,80	5201
	M2	2879	1507	44,99	2423	1706	50,94	4,07	5302
	M3	2850	1492	44,54	2402	1692	50,49	4,96	5252
	<i>Valeur moyenne</i>	2845	1489	44.46	2406	1694	50.58	4.94	5251
Échantillons de maçonnerie à l'échelle 1: 5	M'1	3300	1727	51,57	2273	1601	47,78	0.65	5573
	M'2	3200	1675	50,01	2380	1676	49,61	0.38	5560
	M'3	3100	1623	48,45	2470	1739	51,54	0,01	5552
	<i>Valeur moyenne</i>	3200	1675	50	2374	1672	49.64	0.34	5561

Tableau 8. Données sur la composition des échantillons (l'auteure).

Pour les échantillons à l'échelle 1 : 2, les valeurs du pourcentage de volume de blocs de pierre sont légèrement inférieures à la valeur théorique égale à 50% comme recommandé par la tradition de construction. Cet écart est dû à l'utilisation de blocs de pierre plus gros qui ne permettent pas d'obtenir le poids théorique souhaité sinon de les écraser davantage. Pour les échantillons à l'échelle 1 : 5, l'utilisation de blocs de plus petites tailles a permis un équilibre des poids plus proche du théorique. Dans le tableau 4.5, les pourcentages en volume de chaque composant sont également indiqués. On peut observer que dans les échantillons M ont une porosité, qui est située entre les blocs et le mortier, qui au contraire n'est pas présente dans les échantillons M'.

Les matériaux disponibles ont permis d'obtenir trois échantillons parallélépipédiques (Figure 105.a) de la maçonnerie à l'échelle 1 : 2 (nommés Échantillon M 1, Échantillon M 2 et Échantillon M 3) et trois échantillons parallélépipédiques de la maçonnerie à l'échelle 1 : 5 (nommés Échantillon M'1, Échantillon M'2 et Échantillon M'3). Dans un premier temps, les échantillons parallélépipédiques ont été soumis à un essai de flexion trois points ; après l'essai de flexion, les deux pièces issues de la division des échantillons parallélépipédiques sont utilisées pour les essais de compression et de traction indirecte (brésilien). En particulier, pour chaque échantillon soumis à l'essai de flexion trois points, une pièce est dédiée à l'essai de compression et la seconde moitié à l'essai de traction indirecte. Par conséquent, à partir des échantillons de la maçonnerie à l'échelle 1: 2, Échantillon M 1, Échantillon M 2 et Échantillon M 3, ont été respectivement obtenus les échantillons (Échantillon M 1-C et Échantillon M 1-T), (Échantillon M 2- C et Échantillon M 2-T), et, (Échantillon M 3-C et Échantillon M 3 -T), tandis que de L'échantillon M'1, Échantillon M'2 et Échantillon M'3 ont été respectivement obtenus les échantillons (Échantillon M '1-C et Échantillon M' 1-T), (Échantillon M '2-C et Échantillon M' 2-T), et (Échantillon M '3-C et Échantillon M' 3 -T). l'ensemble d'échantillons (Échantillon M 1-C; Échantillon M 2-C; Échantillon M 3-C) et (Échantillon M '1-C; Échantillon M' 2-C; Échantillon M '3-C) sont dédiés à la compression test, et qui ont été transformés en une forme cubique d'environ 10 cm de taille (Figure 105.b); tandis que les ensembles d'échantillons (Échantillon M 1-T; Échantillon M 2-T; Échantillon M 3-T) et (Échantillon M '1-T; Échantillon M' 2-T; Échantillon M '3-T) sont concernés par les essais de traction, et qui ont été transformés en cylindre d'environ 8 cm de diamètre et 10 cm de hauteur (Figure 105.c). On peut

souligner que l'appareil et la procédure utilisés pour les tests mécaniques pour la pierre sont les mêmes utilisées pour la maçonnerie, qui sont déjà décrites.

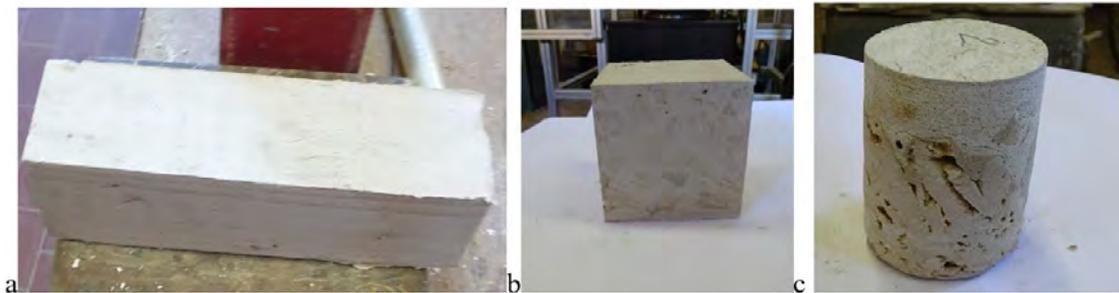


Figure 105. a. Échantillon parallélépipédique pour le test de flexion trois points. b. Spécimen cubique pour le test de compression uniaxiale. c. Spécimen cylindrique pour le test de traction indirect (l'auteur, 2020).

▪ Expérimentations

Les essais de flexion trois points (Figure 106) ont été réalisés en soumettant les échantillons à un moment de flexion en appliquant une charge concentrée au milieu de la surface supérieure. Dans le test de flexion trois points, la partie supérieure de l'échantillon est en compression tandis que la partie inférieure est en tension. En accord avec (UNI EN 1015-11, 2007), la résistance à la flexion, f , a été calculée par l'expression $f=1.5 \frac{Fl}{bd^2}$, où F est la charge maximale supportée par l'éprouvette, l est la distance entre les rouleaux qui supportent l'éprouvette, b est la largeur de l'éprouvette et d est son épaisseur, en référant à la figure 4.16.c. Les résultats des essais de flexion trois points sont rapportés dans le tableau 9 et la figure 107.

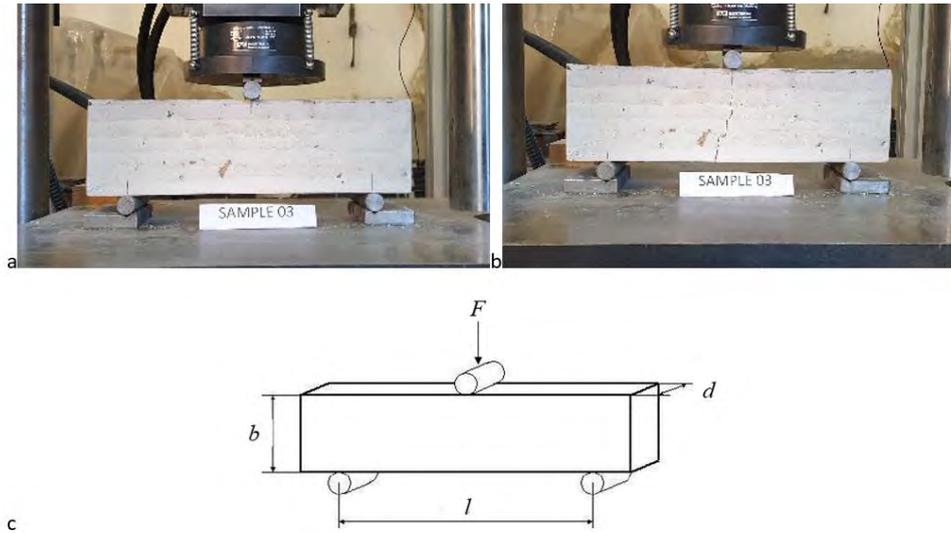


Figure 106. a & b. Essai de flexion trois points, avant et après, sur une éprouvette représentative de la maçonnerie en Rose des Sables, (l'auteure). c. Schéma d'explication de la géométrie et des données des éprouvettes de flexion trois points utilisée (réalisé par l'auteure selon (UNI EN 1015-11, 2007)).

Echantillon		Dimensions				F_{max} (N)	Déplacement (mm)	Résistance à la flexion (Mpa)	Valeur moyenne	Coefficient de variation
		d (mm)	l (mm)	b (mm)	L (mm)					
Échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 2	M1	98.5	327	98.4	335	2531	1.23	1.3	1.3	0.08
	M2	96	327	99.1	335	2607	1.11	1.4		
	M3	97	327	99	335	2261	0.91	1.2		
Échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 5	M'1	101	332	100	338	4539	0.82	2.22	2.03	0.08
	M'2	100	335	100	337	3902	0.45	1.96		
	M'3	100	332	99	338	3817	0.69	1.92		

Tableau 9. Résultats des essais de flexion trois points pour la maçonnerie en Rose des Sables (l'auteure).

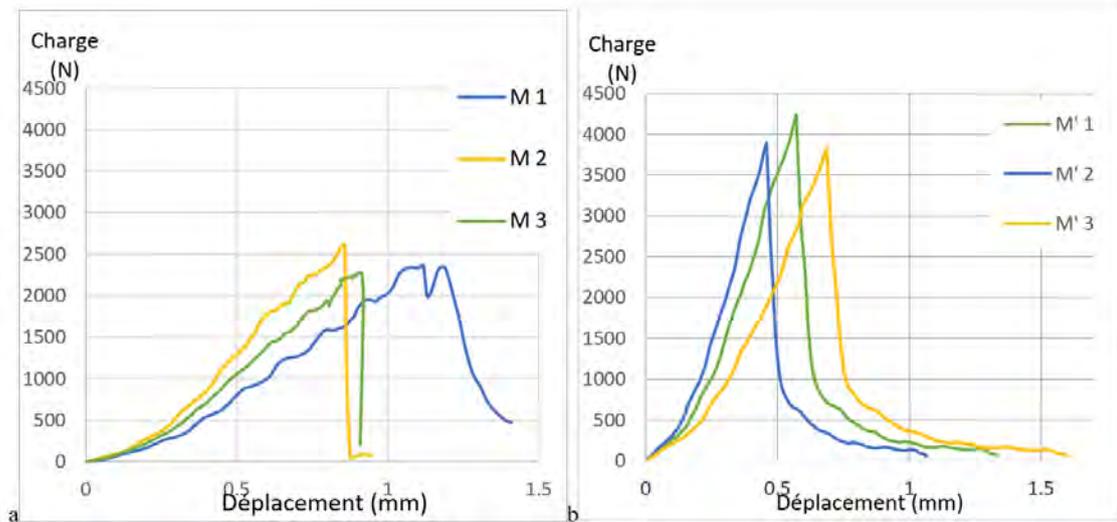


Figure 107. Diagrammes de charge / déplacement enregistrés lors des essais de flexion trois points pour : a. les échantillons de maçonnerie M à l'échelle 1 : 2 ; b. les échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 5 (l'auteure).

Concernant les essais de compression (Figure 108.a), des diagrammes contrainte-déformation ont été enregistrés (Figure 108.b), et les paramètres suivants ont été déterminés : résistance à la compression σ_c , module d'élasticité E , ductilité cinématique μ_c et ductilité cinématique disponible μ_{cd} . Les résultats des tests de compression uniaxiale sont rapportés dans le tableau 10.

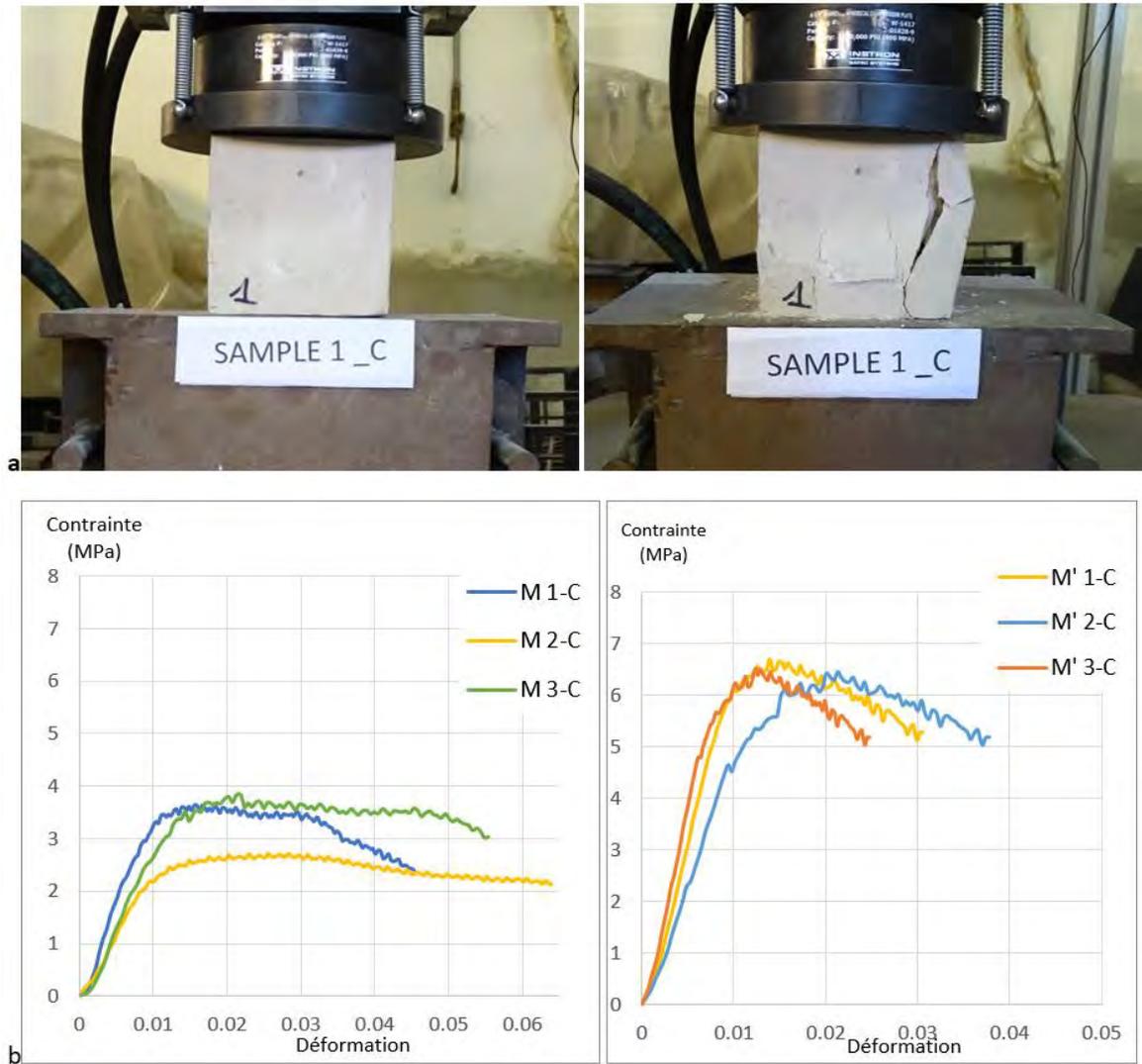


Figure 108. a. Test de compression uniaxiale (l'auteure, 2020). b. Diagrammes contrainte-déformation enregistrés lors des essais de compression uniaxiale pour : a. les échantillons de maçonnerie M à l'échelle 1 : 2 et les échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 5, (l'auteure).

Echantillon	Dimensions (mm)			Surface (mm ²)	Résistance à la compression σ_c (Mpa)	Module d'élasticité apparent E (Mpa)	Ductilité cinématique μ_c	Ductilité cinématique disponible μ_{cd}	
	A	B	H						
Échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 2	M 1_C	99.25	98.45	96.4	9771.16	3.79	400	1.28	1.87
	M 2_C	98.55	97.65	99.1	9623.41	2.75	283.3	2.55	1.64
	M 3_C	101	99.9	99.9	10089.9	3.84	333.3	1.7	1.72
	<i>Valeur Moyenne</i>					3.46	338.88	1.69	1.74
	<i>Écart-type</i>					0.62	58.55	0.41	0.12
	<i>Coefficient de variation</i>					0.18	0.17	0.24	0.07
Échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 5	M' 1_C	101.1	99.8	100	10089.7	6.91	642.86	1.47	1.65
	M' 2_C	99	97.9	97	9751.5	6.46	562.5	1.54	1.4
	M' 3_C	98.55	99.1	99	9756.45	6.52	820	1.5	1.42
	<i>Valeur Moyenne</i>					6.63	675.12	1.5	1.49
	<i>Écart-type</i>					0.24	131.75	0.035	0.14
	<i>Coefficient de variation</i>					0.04	0.20	0.02	0.09

Tableau 10. Résultats des tests de compression uniaxiale de la maçonnerie en Rose des Sables (l'auteure).

Concernant le test de traction indirecte (Figure 109), les résultats sont rapportés dans le tableau 11. Selon (ASTMD3967-16, 2016), la résistance à la traction est déterminée en considérant la formulation suivante : $f_t = \frac{2F}{\pi A}$, où F est la charge de rupture et A est l'aire du cercle inscrit dans la section verticale rectangulaire sous la charge.

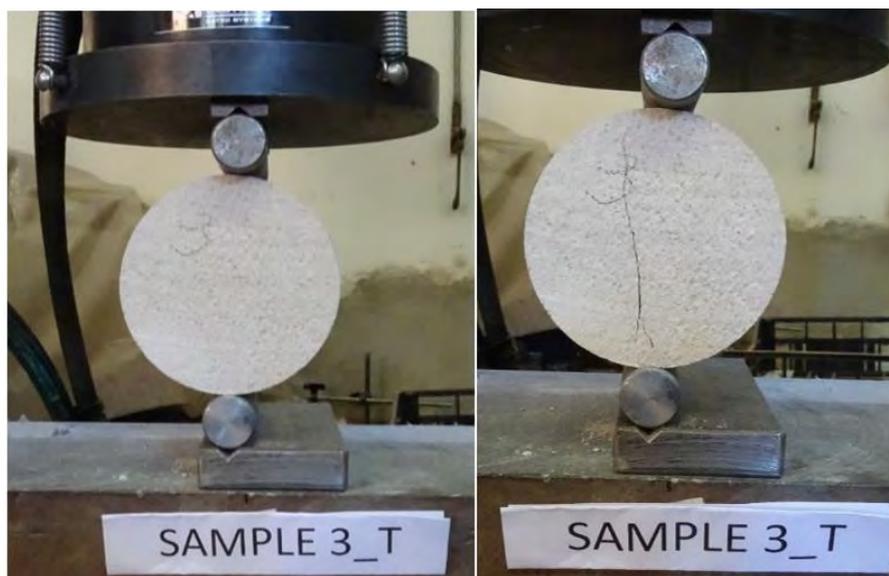


Figure 109. Essai de traction indirecte (l'auteure, 2020).

Echantillon		Dimensions (mm)		surface (mm ²)	Fmax [N]	Résistance à la traction σ_t (Mpa)	Valeur Moyenne	Coefficient de variation
		d	L					
Échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 2	M 1_T	79.2	100.5	7959.6	4739	0.38	0.33	0.18
	M 2_T	79.3	99.9	7922.07	3302	0.27		
	M 3-T	79	100	7900	4390	0.35		
Échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 5	M' 1_T	79.9	101.1	8077.89	7394	0.58	0.57	0.04
	M' 2_T	79.80	100.00	7980	7307	0.58		
	M' 3-T	79.7	101	8049.7	6890	0.55		

Tableau 11. Résultats des essais de traction indirecte (l'auteure).

▪ *Évaluations analytiques sur les expérimentations*

En utilisant les données du tableau 5 concernant les caractéristiques physique et mécanique de DR2 , il est possible d'appliquer la formule des mélanges (Zulkefli et al., 2018) pour déterminer le module d'élasticité d'un milieu hétérogène en fonction du module d'élasticité des composants et du rapport volumétrique: $E_M = V'_m E_m + V'_b E_b$, où E_M est le module d'élasticité de maçonnerie ; E_m est le module d'élasticité de mortier, E_b module d'élasticité de bloc ; V'_m est le rapport volumique du mortier dont $V'_m = V_m / V_M$, ou V_m est le volume du mortier et V_M est le volume de l'échantillon de maçonnerie ; V'_b est le rapport volumique de la pierre dont $V'_b = V_b / V_M$, où V_b volume de blocs et V_M est le volume de l'échantillon de maçonnerie. Les résultats sont reportés dans le tableau 12.

Echantillons	Module d'élasticité E (MPa)
M1	722.6
M2	735.2
M3	728.4
<i>Valeur Moyenne</i>	728.7
M'1	755.3
M'2	759
M'3	762.9
<i>Valeur Moyenne</i>	759

Tableau 12. Estimation du module d'élasticité des échantillons des maçonnerie en Rose des Sables par la formule des mélanges (l'auteure).

Les résultats analytiques, qui prédisent une adhérence parfaite entre les deux matériaux, surestiment les résultats expérimentaux. En particulier, pour la maçonnerie à l'échelle 1 : 2, la surestimation est de l'ordre de 389.82 MPa, tandis que pour celles à l'échelle 1 : 5, la prévision analytique est beaucoup plus précise, avec une surestimation de seulement 83.88 MPa. Ce résultat met donc en évidence qu'en ce qui concerne la rigidité de la maçonnerie, la plus grande homogénéité des échantillons à l'échelle 1 : 5 permet un nombre beaucoup plus grand de surfaces d'adhérence permettant une collaboration entre les composants. Il est également possible de faire l'hypothèse que les phénomènes de microfissuration se produisent déjà à de faibles valeurs de l'état de

contrainte appliqué et que dans des échantillons à l'échelle 1 : 2, ils ont un effet plus important.

D'autre part, selon (EUROCODICE 6, 2007), la formule sur la résistance à la compression de la maçonnerie ordinaire est $f_M = 0,5 f_b^{0,7} f_m^{0,3}$, où f_M est la résistance à la compression de la maçonnerie, f_b résistance à la compression des blocs et f_m résistance à la compression du mortier. Dans le cas présent, la résistance de la maçonnerie est de 2,46 MPa, où sous-estimant légèrement à la maçonnerie à l'échelle 1 : 2 et beaucoup à celle à l'échelle 1 : 5. Dans ce cas aussi, il est important de noter que l'adhérence dans la maçonnerie en *Rose des Sables* à l'échelle 1 :5 est très élevée.

▪ *Discussion des résultats expérimentaux*

Les résultats des divers tests mécaniques (tableaux 9, 10 et 11) montrent que les échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 2 et ceux de maçonnerie à l'échelle 1 : 5 présentent des propriétés mécaniques différentes (figures 107 et 108.b). Les échantillons de maçonnerie à l'échelle 1: 2 ont une résistance à la compression ($\sigma_c = 3,46$ MPa) inférieure à la résistance à la compression des échantillons de maçonnerie à l'échelle 1: 5 ($\sigma_c = 6,63$ MPa), en particulier la résistance à la compression de la maçonnerie à l'échelle 1: 2 représente environ la moitié (52%) de celle de la maçonnerie à l'échelle 1: 5. Aussi, la même observation pour le module d'élasticité des échantillons de maçonnerie à l'échelle 1: 2 est d'environ 50% de ceux de la maçonnerie à l'échelle 1: 5, à savoir, la valeur de la première maçonnerie est ($E = 338,88$ MPa), tandis que le second est ($E = 675,12$ MPa).

Les valeurs de la ductilité cinématique et de la ductilité cinématique disponible des échantillons des deux échelles sont proches, en notant que les valeurs pour les échantillons de maçonnerie à l'échelle 1: 2 ($\mu_c = 1,7$; $\mu_{cd} = 1,72$) sont plus grandes que celles de maçonnerie à l'échelle 1: 5 ($\mu_c = 1,5$; $\mu_{cd} = 1,49$) contrairement aux propriétés mécaniques précédentes (σ_c ; E).

Concernant le test de traction indirecte (brésilien) et le test de flexion trois points, les faibles valeurs de la résistance à la traction et la résistance à la flexion sont celles des échantillons de maçonnerie à l'échelle 1: 2 ($\sigma_t = 0,33$ MPa; $f = 1,3$ MPa), soient respectivement environ 58% et 64% de ceux de l'échantillon de maçonnerie à l'échelle 1: 5 ($\sigma_t = 0,57$ MPa; $f = 2,03$ MPa). Les deux ensembles d'échantillon ont une résistance

à la traction égale à 10% (échantillons de maçonnerie à l'échelle 1: 2) et 9% (échantillons de maçonnerie à l'échelle 1: 5) de la résistance à la compression. Ce rapport des résistances à la traction et à la compression se situe dans l'intervalle typique des matériaux de maçonnerie.

D'autre part, le test de flexion trois points permet également de vérifier la valeur du test de traction. Les valeurs de résistance à la flexion sont supérieures à la résistance à la traction, où les résistances à la traction sont égales à 25% (de la maçonnerie à l'échelle 1 : 2) et 28% (échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 5) de la résistance à la flexion. Aussi, ces rapports sont dans l'intervalle typique des matériaux de maçonnerie et sont dus à la mécanique de la flexion qui implique non seulement la traction mais aussi la compression de la partie supérieure de l'échantillon.

Les meilleures caractéristiques mécaniques (liées à la résistance à la compression, au module d'élasticité et aux résistances à la traction et à la flexion) dans les échantillons de maçonnerie à l'échelle 1 : 5 peuvent être liées aux effets de taille. Destiné aux échantillons constitués d'un conglomérat de mortier de gypse avec des agrégats fabriqués à partir de blocs de pierre, les échantillons à l'échelle 1 : 5 sont constitués d'agrégats plus petits que la taille des échantillons. Cela permet de créer un matériau plus "homogène " avec beaucoup plus de surfaces d'adhérence entre les blocs et le mortier. Le plus grand nombre de surfaces d'adhérence est le facteur qui confère résistance et la rigidité, permettant une collaboration entre les composants. L'adhérence incomplète entre les blocs et le mortier dans les échantillons à l'échelle 1 : 2 est également mise en évidence par la présence de vides, causés par la difficulté du mortier à remplir tout le volume de l'échantillon (tableau 8).

L'application de la formule des mélanges pour déterminer le module d'élasticité des matériaux hétérogènes, met en évidence que les différences de module d'élasticité des deux types d'échantillons ne sont pas dues à la petite différence dans la quantité relative des matériaux, mais un autre phénomène qui prend en compte du lien entre les matériaux. L'application de la formule Eurocode 6 pour calculer la résistance de la maçonnerie à travers la résistance des composants, conduit à une bonne estimation pour 1 : 2 et une sous-estimation décisive pour 1 : 5, soulignant que l'adhérence entre les composants dans ce second cas est très efficace, certainement supérieure à celle qui est établie dans une maçonnerie en brique ordinaire pour laquelle elle est calibrée.

Encore une fois, il est possible de souligner que c'est précisément le lien entre les composants qui est le facteur clé de la technique de construction sur laquelle repose la maçonnerie en *Rose des Sables* et de mortier de gypse, qui ne peut pas s'appuyer sur des blocs carrés et des textures qui respectent les règles de l'art pour les murs (Borri et al., 2015). En ce qui concerne les résultats pour la ductilité cinématique et la ductilité cinématique disponible, les échantillons à l'échelle 1 : 2 ont montré des valeurs légèrement plus élevées, imaginant que les microfissures sont plus présentes dans l'échantillon à l'échelle 1 : 2 devant également suivre des chemins plus articulés autour des blocs plus grands que ceux dans l'échantillon à l'échelle 1 : 5.

En conclusion, il est vrai que les tests minéralogiques et pétrographique ont montré que les composants de la maçonnerie (la pierre et le mortier) partagent des composants minéralogiques importants ce qui permet de créer un conglomérat de bonne adhérence (de point de vue minéralogique) et donc un bon comportement de la maçonnerie. Cependant, les résultats des tests mécaniques de la maçonnerie et ses composants ont montré une complexité dans l'interprétation du comportement mécanique de cette composition. En effet, se retrouvent plusieurs facteurs déterminant le comportement de la maçonnerie. Parmi ces facteurs : la nature de la pierre, caractérisée par une porosité élevée et variée d'un bloc à un autre ; aussi l'hétérogénéité de la maçonnerie et sa texture irrégulière surtout dans les surfaces d'adhérence entre les blocs et le mortier... Dès lors, les caractéristiques mécaniques de la maçonnerie sont relativement basses, et comme il est déjà mentionné précédemment (Supra chapitre 3), le mode constructif de la maçonnerie en *Rose des Sables* ne respecte pas les règles de l'art, ce qui est la raison d'apparition de certains dommages dans les constructions. Cela a été confirmé par l'analyse numérique du comportement structurel du cas d'étude, qui a intégré les caractéristiques physiques et mécaniques obtenues de la maçonnerie.

2. Analyse du comportement structurel

L'analyse du comportement physico-chimique et mécanique de la *Rose des Sables*, *Tafza* -la première matière pour produire le gypse-, le mortier de gypse et la maçonnerie en *Rose des Sables*, permet de comprendre le fonctionnement de cette maçonnerie historique et les origines des pathologies (Supra chapitre 3), par la détermination des différents paramètres. Parmi ces derniers sont les caractéristiques mécaniques, et qui sont nécessaires pour cette analyse de comportement structurel. Elles permettent de comprendre la typologie structurelle de la construction à coupole en *Rose des Sables*, c'est-à-dire, identifier le degré de comptabilité de la forme géométrique avec les caractéristiques mécaniques de la maçonnerie. A travers ces résultats, il est possible de connaître les causes des fissures et leur propagations observés *in situ* (Supra chapitre 3). Ainsi, il est important d'identifier la nature des dommages tout en vérifiant les hypothèses de l'évaluation préliminaire de diagnostic (Supra chapitre 3).

La méthode d'éléments finis FEM a été choisie pour simuler le comportement structurel des cas d'étude, à signaler que la maçonnerie en *Rose des Sables* est constituée en conglomérat avec une composition minéralogique de matériaux similaire. Les modèles FE visait à étudier le comportement structurel à travers des analyses statiques élastiques linéaires et non linéaires. L'étude s'est limitée aux analyses en mode statique, car selon (DTR BC 2-48, Règles Parasismiques Algériennes RPA 99, 2003) la classification des zones sismiques RPA99 montrent que la Wilaya de *Oued Souf* est classée dans la zone 0, dont la sismicité est négligeable. L'évaluation du comportement structurel d'une coupole autonome a été d'abord élaboré en premier, du fait que la coupole est l'élément le plus vulnérable dans la structure. De même, une simulation de comportement structurel (à l'échelle de la construction) d'une double cellule à coupoles a été réalisé, vu que ces dernières présentent des désordres plus avancés (Supra chapitre 3).

a) *Évaluation du comportement structurel des coupoles*

Le relevé direct de plusieurs coupoles a permis de construire la géométrie d'une forme représentative. Sur la base de ce modèle, une étude structurelle préliminaire, à travers la méthode des éléments finis (FEM), a été réalisée au moyen d'analyses élastiques linéaires et non linéaires de l'ensemble de la coupole représentative pour mettre en évidence la répartition des contraintes au voisinage des diagonales et dans les

broches, reliées aux géométries. En outre, une tranche de la coupole a été étudiée par l'approche statique de l'analyse limite.

Regardant l'analyse avec élément finis, le modèle représentatif de la coupole a été maillé selon une disposition très régulière. Il s'agissait de réaliser un système de référence local commun à tous les éléments, c'est-à-dire orienté le long des parallèles et des méridiens de la direction de la coupole. La direction x est pour les parallèles et la direction y est pour les méridiens. La modélisation FEM a été réalisée grâce au logiciel de code commercial DIANA FEA (DIANA FEA, 2009). Les éléments finis coque incurvés réguliers (éléments Quad 4 et Hex 6) ont été utilisés, car le comportement au milieu de la surface, également au vu des dimensions réduites des structures, est considéré comme être représentatif de manière satisfaisante. Les éléments choisis, qui sont basés sur une approche solide dégénérée iso paramétrique, se caractérisent à la fois par un comportement de membrane et de flexion (DIANA FEA, 2009), en introduisant l'épaisseur de la coupole de 18 cm et une dimension d'élément maximale d'environ 25 cm.

Le modèle a été contraint au *springer*⁶ de manière à libérer les déplacements dans la direction perpendiculaire à chaque bord de la coupole et la rotation autour de la direction du bord lui-même comme indiqué par les flèches sur la figure 110. Le choix des conditions aux limites, bien qu'induisant un déplacement aux coins dans la direction diagonale, ressemble à un état fissuré aux intersections des murs avec une rotation consécutive au pied du mur et le *springer* de la coupole. Ce faisant, la capacité sensiblement négligeable des parois à résister au renversement hors du plan peut être représentée, exprimant ainsi une hypothèse sûre. Une condition aux limites épinglé des bords de la coupole, induisant la fixité des déplacements diagonaux et des bords, aurait impliqué une réponse complètement différente induite par une boîte de maçonnerie rigide sous-jacente, une schématisation dangereuse loin de la réalité.

⁶ Le voussoir le plus bas de chaque côté d'un arc. C'est là que le support vertical de l'arc se termine et que la courbe de l'arc commence (Galassi & Tempesta, 2019; Vandal, 2020)

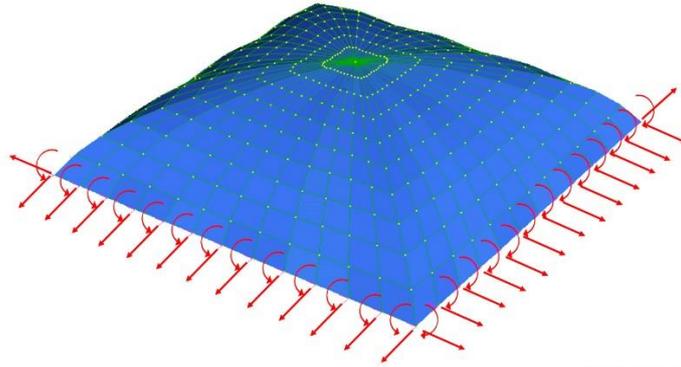


Figure 110. Géométrie du modèle de coupole et les conditions aux limites (l'auteure).

La valeur du module d'élasticité entrée dans le programme est de 338.88 MPa, obtenue comme valeur moyenne des résultats expérimentaux des tests sur l'échantillon de la maçonnerie M à l'échelle 1 : 2. Ce dernier a été choisi car il présentait des paramètres mécaniques inférieurs à la maçonnerie M', afin d'avoir des marges de sécurité pour les résultats d'analyse, aussi car la maçonnerie à l'échelle 1 : 2 est plus proche de l'échelle réelle. Donc, elle est relativement la plus représentative. La valeur choisie du module de Young est en ligne avec celles des maçonneries en pierre irrégulières constituées de blocs faibles et poreux, comme le *Tuf*, comme le montrent un laboratoire (Borri et al., 2015) et des enquêtes sur le terrain (Luisa Rovero et al., 2016).

Sur la figure 111, la contrainte de compression le long des parallèles (contrainte xx) et des méridiens (contrainte yy) sur la surface moyenne sont illustrées. Les zones soumises à la traction sont exclues du tracé de contour et sont indiquées par une couleur grise au niveau des coins. À chaque parallèle, la contrainte de compression dans la direction horizontale est plus faible aux diagonales et au milieu des broches, ce qui suggère la propension de ces zones à subir des dommages, comme relevé sur place. De plus, la répartition des contraintes le long des parallèles est approximativement constante le long de chaque parallèle avec une valeur de compression maximale de -0,0519 MPa dans la partie supérieure et une traction maximale de 0,0248 MPa dans la partie inférieure des arcs diagonaux, zones grises sur la figure 111. a. Concernant la direction méridienne, l'analyse des résultats a permis d'observer que la valeur de compression maximale est de -0,0269 MPa dans la partie supérieure, et la valeur de traction maximale est de 0,0876 MPa dans la partie inférieure des arcs diagonaux, zones

grises sur la figure 111.b. Cela est dû au fait que les bords de la coupole sont libres de se translater vers l'extérieur.

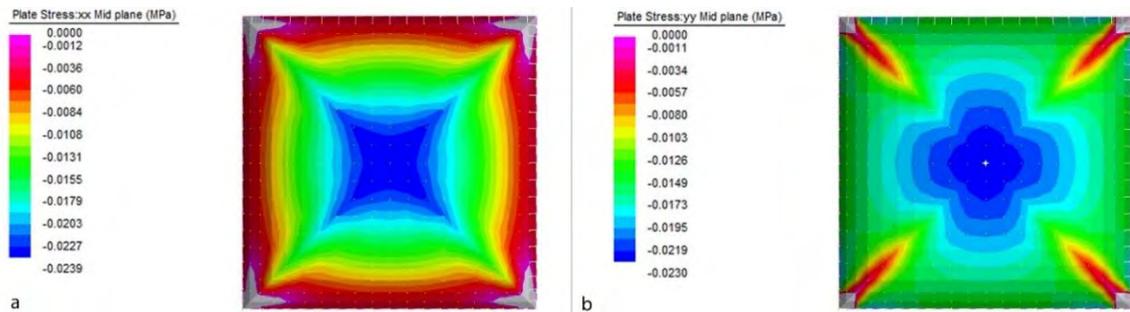


Figure 111. Résultat de l'analyse linéaire FEM : contrainte dans la surface moyenne de la coupole a. le long des parallèles ; et b. le long des méridiens (l'auteure).

La distribution des contraintes est conforme à ce qui est rapporté dans (D'Ayala & Tomasoni, 2011, 2008; Lancaster, 2015) pour les coupoles en arc de cloître, soulignant que les points critiques sont les arcs diagonaux qui sont soumis à la contrainte de traction. Pour le cas analysé, le niveau de contrainte de traction n'est pas élevé car la coupole est petit et seuls les auto-poids ont été pris en compte dans l'analyse. Compte tenu des résultats expérimentaux des échantillons de la maçonnerie à l'échelle 1 :2 avec des caractéristiques inférieures, la résistance à la traction peut être estimée, comme d'habitude pour les matériaux de maçonnerie, à environ 10% de celle de compression et donc autour de 0,33 MPa, soit -3.46 MPa la résistance à la compression. Il est toutefois important de souligner que la technique de construction, basée sur des blocs très irréguliers, produit une maçonnerie à échelle réduite dont les paramètres mécaniques sont bien inférieurs à ceux de l'échelle réelle. Il est donc facile d'interpréter les modèles de fissures souvent observés lors des investigations *in situ* (Supra chapitre 3, Figure 69,70 ,71, 72, 76& 77).

De plus, dans le cadre de l'analyse limite, l'étude d'une tranche médiane de la coupole, où sont généralement enregistrées les poussées maximales, a été réalisée en utilisant la méthodologie du facteur de sécurité complet « *full range factor of safety* » proposée dans (Galassi & Tempesta, 2019; Tempesta & Galassi, 2019). Grâce à l'analyse d'une simple tranche de la coupole, la procédure est simplifiée car l'état de contraintes biaxiales de la coupole n'est pas pris en compte et l'effet de collaboration dû aux parallèles est négligé. La tranche de coupole discrétisée en 20 éléments, et la ligne de poussée associée au poids propre des éléments sont tracées sur la figure 112. Le poids propre a été calculé en considérant le poids spécifique obtenu à partir de

l'expérimentation sur des échantillons prélevés *in situ* (Tableau 4). En utilisant la méthode des différences finies, la procédure choisit, parmi ∞^3 polygones funiculaires associés au poids propre de l'arc, celui qui minimise la distance avec l'axe de l'arc. Ensuite, la gamme complète des lignes de poussée d'équilibre, donc internes aux arcs de maçonnerie, est obtenue en déplaçant la ligne de poussée, précédemment trouvée, vers le haut et vers le bas jusqu'à ce qu'elle touche la limite supérieure et inférieure de l'arc.

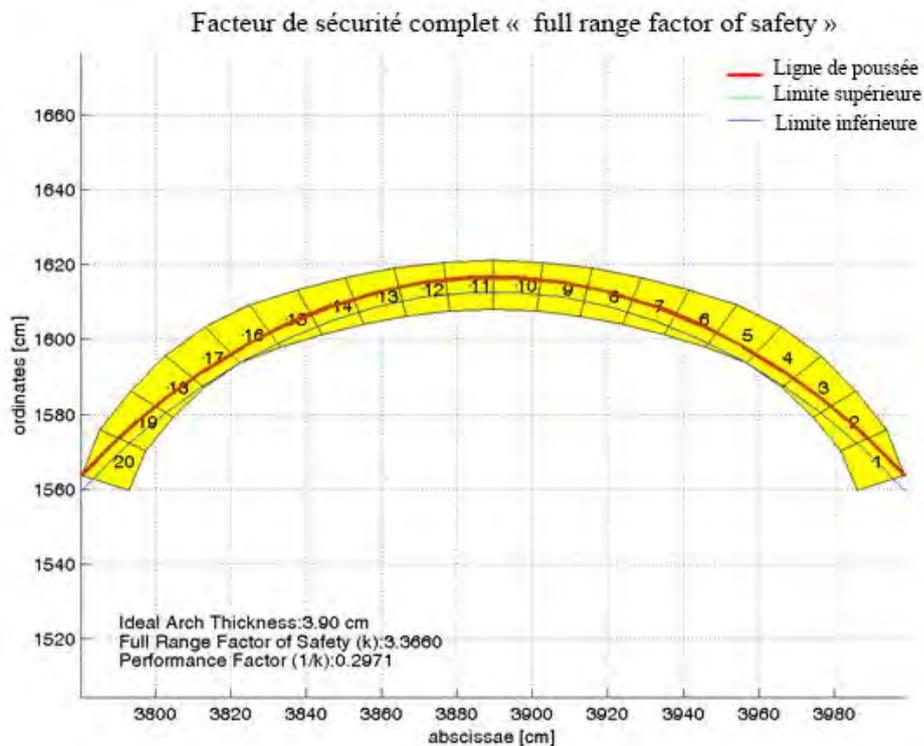


Figure 112. Ligne de poussée de la tranche de la coupole obtenue selon la méthode proposée dans (Galassi et Tempesta 2019), (Cheima Azil).

Selon le théorème statique de l'analyse limite, puisqu'une ligne de poussée est entièrement contenue dans le profil de l'arc, donc, le profil de la coupole est en sécurité. Afin de calculer le degré de sécurité, les lignes de poussée inférieure et supérieure qui délimitent les états d'équilibres admissibles, permettent d'évaluer le domaine de sécurité. Le domaine de sécurité contient toutes les lignes de poussée parallèle au polygone de calcul. Le degré de sécurité est calculé comme le rapport entre : l'épaisseur du domaine et l'épaisseur minimale de l'arc, tous deux mesurés le long de la direction verticale (Galassi & Tempesta, 2019; Tempesta & Galassi, 2019). Le degré de sécurité peut être compris entre 0 et 1 : le facteur 0 pointe vers une arche dangereuse, tandis que le facteur 1 correspond au plus en sécurité. Sur la figure 112, la ligne de poussée

sélectionnée et les lignes de poussée des limites supérieures et inférieures associées sont indiquées, et le degré d'évaluation de la sécurité a fourni un degré de sécurité égal à 0,29, ce qui pointe vers une tranche moins sécurisée. Il est également possible d'observer que la ligne de poussée limite supérieure coïncide presque avec la ligne de poussée sélectionnée. Ceci est dû à la forme peu profonde de la tranche, pour laquelle la ligne de poussée sélectionnée est tangente au bord supérieur en correspondance des écoinçons.

Ce résultat, associé au degré de sécurité de 0,29, met en évidence les écoinçons de la coupe comme des zones critiques liées à la position de la ligne de poussée, qui est éloignée de l'axe médian de la coupe, même si elle est contenue dans le profil de l'arc. Ces zones sont des emplacements possibles de charnières et donc des fractures de traction dans le plan de coupe, ainsi qu'un éventuel écrasement par compression au niveau de la charnière. De plus, l'inclinaison de la dernière branche de la ligne de poussée indique que les parois de support peuvent ne pas être capables de s'opposer.

Concernant les résultats de l'analyse non linéaire, constitué dans la distribution des déformations de fissure sont présentés dans la figure 4.23. Les résultats sont référencés à la surface moyenne du modèle. Selon les résultats, les déformations de fissure varient entre $-2,6e-13$ dans la majeure partie du modèle et $3,27e-6$ dans les arcs diagonaux d'angle (Figure 4.23). Cela est grâce au type de la contrainte qui permet plus de déplacement. En raison de la plus grande déformabilité du modèle, ce qui aborde moins clairement la qualité du processus d'endommagement de la coupole, sur une fraction très limitée de l'accélération de la gravité peut être maintenue, car le calcul diverge rapidement. Dès lors, Une étude plus approfondie impliquera la modélisation de la cellule entière pour fournir à la base de la coupole une rigidité équilibrée calibrée sur la hauteur et l'épaisseur de la paroi. De ce fait, et vue les désordres observés à l'échelle d'une double cellule à coupoles (Supra chapitre 3, Figure 13), il est opté pour la simulation de comportements d'un modèle composé de deux cellules à coupole.

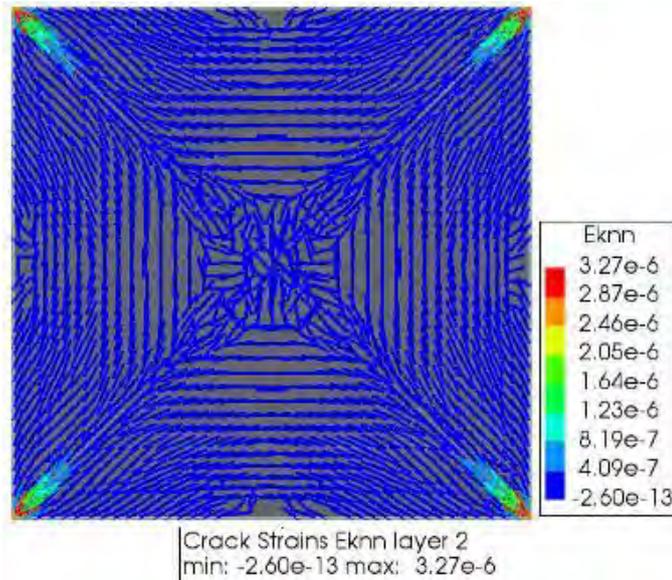


Figure 113. Résultat de l'analyse non linéaire FEM : Distribution des déformations de fissures dans la surface moyenne de la coupole.

b) Évaluation du comportement structurel des cellules à coupoles

1. Processus de réalisation du modèle 3D

Afin d'analyser le comportement structurel d'une double coupole à cellule, un modèle 3D de celle-ci est nécessaire. Donc, un processus de réalisation de modèle 3D HBIM a été élaboré. Ce processus nécessite une collaboration et un échange entre différents logiciels, un ordinateur avec des processeurs puissants et suffisamment de temps pour l'élaboration des données. Dans la présente recherche, le balayage laser est utilisé pour l'étude architecturale des constructions (Supra chapitre 2), et fournir un levé géométrique précis afin de connaître en détail toutes les déformations et anomalies (Supra chapitre 3), mais également reconstruire avec une haute précision la forme architecturale et les dimensions de la construction pour l'exploiter dans l'étude structurelle. Ensuite, un processus de traitement du nuage des points a été effectué à travers plusieurs logiciels, en sélectionnant deux cellules à coupole de la construction relevée. Après l'étape de traitement du nuage des points, un modèle maillé de ces deux cellules à coupole a été créé, en complétant les parties manquantes et en le simplifiant. Ce modèle a été converti en un modèle de maillage en solide pour être importé dans le logiciel des éléments finis utilisés pour effectuer des analyses structurelles.

Concernant le balayage scanner, le relevé de la maison a été réalisée avec le scanner laser terrestre *FARO Focus3D*. En effet, plusieurs scans ont été effectués autour et à l'intérieur de la construction (Figure 114.a), en adoptant des paramètres de haute

résolution et de qualité, afin d'obtenir des données de bonne qualité. L'ensemble de données acquis était d'environ 152 millions de points, dont 500 mille de points appartiennent à la maison concernée, à partir desquelles 250 mille points ont été utilisés pour le modèle des deux cellules à coupole (Figure 114.b). Cela est après un long processus d'enregistrement et l'assemblage des différents scans et simplification à l'aide du logiciel *Recap Pro* Autodesk, avec une approche semi-automatique.

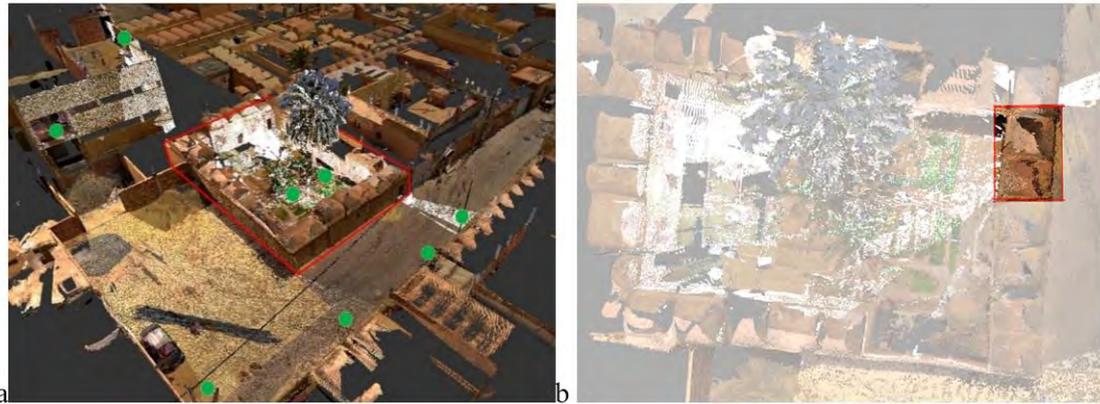


Figure 114. a. Relevé de la maison (entourée par la ligne rouge) par balayage scanner avec plusieurs scans (positionnement des scans en cercle vert). b. Sélection des deux cellules à coupoles pour l'analyse (l'auteure).

Le modèle de maillage triangulé a été obtenu avec le logiciel *MeshLab* version 2020 (Kazhdan & Hoppe, 2013; MesLab, 2016), avec une approche de maillage basée sur la *reconstruction de surface de Poisson* (Kazhdan & Hoppe, 2013), en utilisant les paramètres suivants : Profondeur de reconstruction =12 ; nombre minimum d'échantillons =1.5 ; Poids d'interpolation =4, (Figure 4.25.a). Une certaine simplification du modèle a été réalisé dans ce même logiciel, en suivant des approches basées sur des techniques semi-automatiques pour éviter d'avoir un modèle mal formé dans le cas d'utiliser l'approche automatique. La simplification du modèle est constituée dans la suppression des parties inutiles du maillage comme celles des fissures. Elle permet à réduire le nombre des faces du maillage d'environ huit million faces à cent mille faces, en utilisant l'option « *Simplification : décimale de réduction de bord quadrique* ». Cette dernière simplification permet, d'une part, de transmettre la surface du maillage d'une texture rugueuse (texture du plâtre), (Figure 115.b), à une texture lisse (Figure 115.c). D'autre part, de réduire le nombre des faces qui permet d'alléger le fichier de travail afin de pouvoir importer à un autre logiciel. Et pour avoir une surface du maillage encore plus lisse, une brève opération de simplification a été faite après avec le logiciel *Instant Meshes* (Figure 115.d).

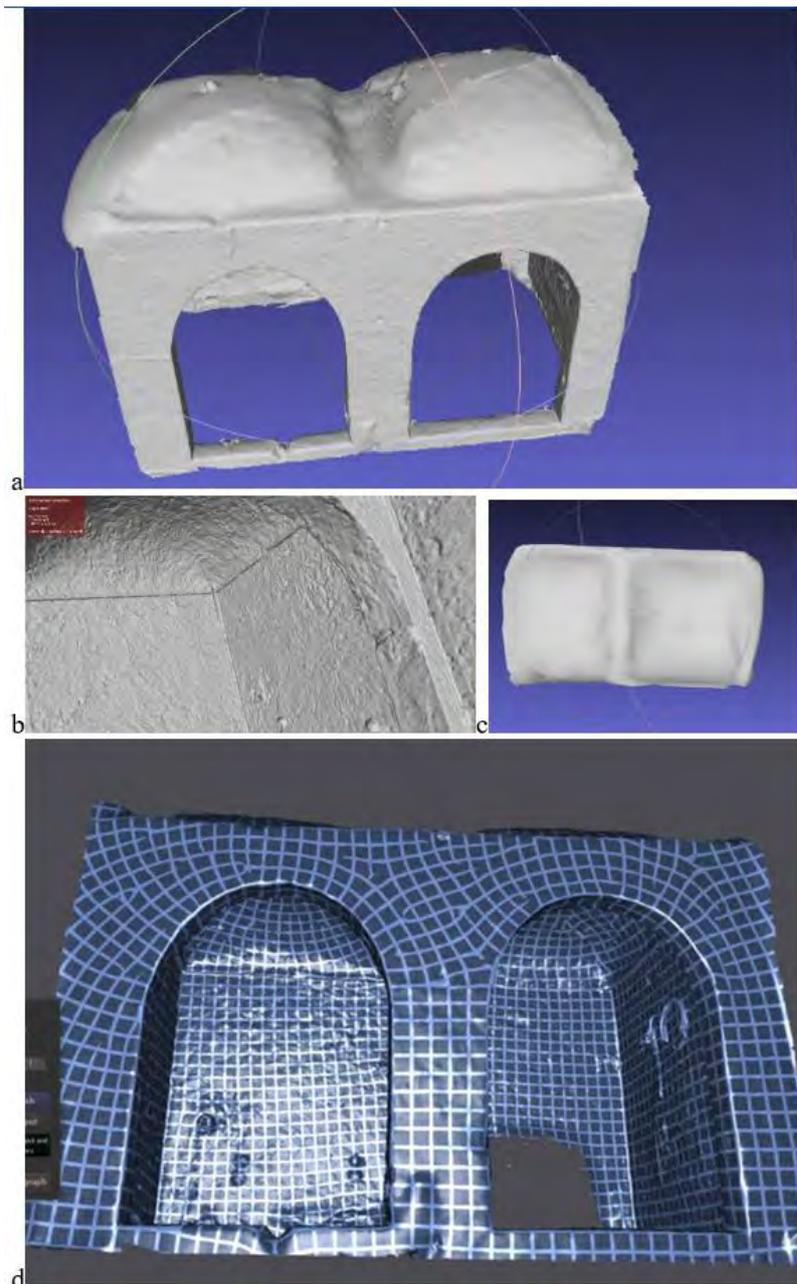


Figure 115. a. Modèle de maillage triangulé obtenu avec le logiciel MeshLab. b. Texture rugueuse de la surface du maillage (texture du plâtre) avant la simplification. c. Texture lisse de la surface du maillage après la simplification. d. Simplification du maillage avec le logiciel Instant Meshes (l'auteur).

Ensuite, le logiciel *Rhinoceros 3D.7* (Rhinoceros 3D, 2019) a été utilisé pour obtenir le modèle en solide pour l'exploiter dans le logiciel de l'analyse structurelle. Mais en premier lieu, une opération de remplissage des trous dans le maillage a été effectuée, tel que les trous des fissures (Figure 116.a). En second lieu, le modèle de maillage (Figure 116.b) a été utilisé pour créer un solide par le plugin *RhinoResurf* (RhinoResurf, 2020). Ce dernier a permis de créer des surfaces *NURBS* à partir du modèle de maillage ((Figure 116.c). Il est important de noter que la valeur de tolérance utilisé est élevée

afin d'éviter d'avoir les bords nus des surfaces *NURBS*, mais également pour éviter les erreurs qui pourraient être engendrées dans le logiciel de l'analyse structurelle qui demande une haute tolérance dans le modèle. À partir des surfaces *NURBS* un modèle en solide a été créé ((Figure 116.d).

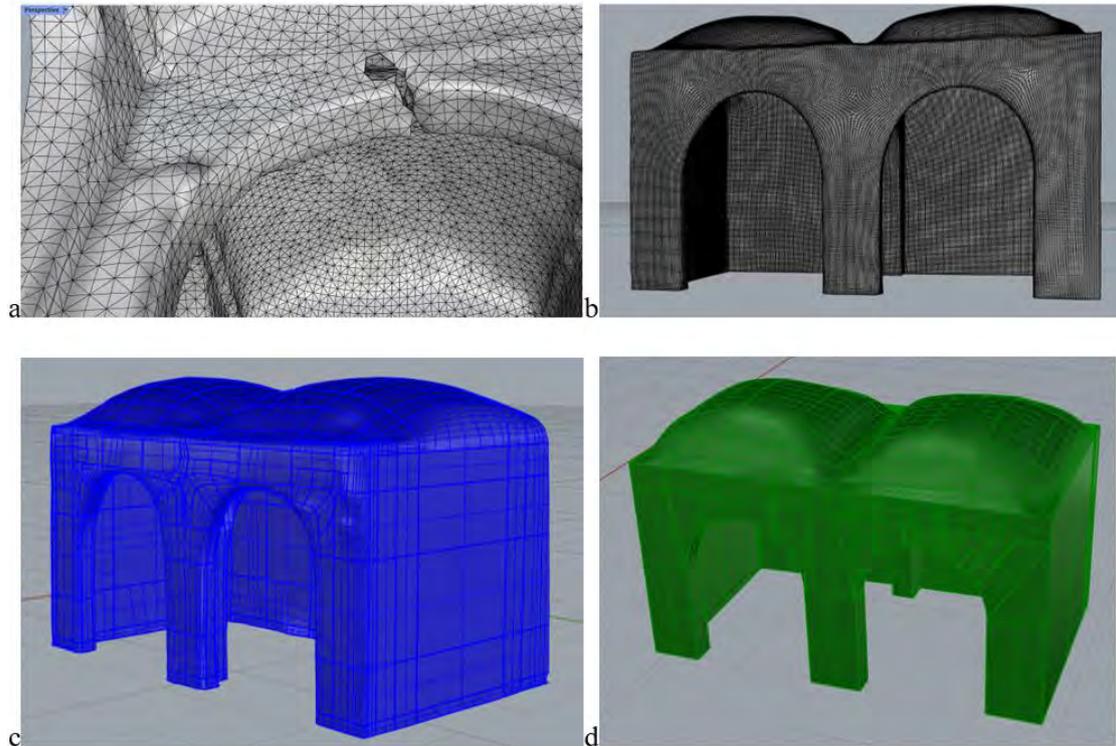


Figure 116. a. Trou de la fissure au niveau maillage du modèle. b. Résultat final du modèle de maillage dans le logiciel Rhinoceros.7. c. Création des surfaces *NURBS* à partir du modèle de maillage par le plugin *RhinoResurf*. d. Création du Solide à partir du modèle des surfaces *NURBS* simplifiées, Rhinoceros.7 (l'auteure).

2. Analyses statiques élastiques linéaires et non linéaires

Le modèle FE tridimensionnel des deux cellules à coupoles a été construit, dont la géométrie a été directement dérivée de l'enquête de nuage de points discutée précédemment, ce qui permet de considérer des défauts reliés à la mise en œuvre et l'irrégularité de la forme des coupoles dans l'évaluation de comportement structurel. Le modèle FE visait à étudier le comportement structurel du modèle à travers des analyses statiques élastiques linéaires et non linéaires, afin de confirmer ou réfuter les hypothèses du diagnostic préliminaire concernant les fractures observées à l'échelle des deux cellules à coupoles, en particulier les coupoles (Supra chapitre 3). Le logiciel commercial DIANA FEA a été utilisé, dont la classe d'élément FE choisie pour le maillage et les solides structurels, avec des éléments solides iso paramétriques à plusieurs nœuds, de type maillages automatiques (éléments Triangle 3, Quad 4 et Hex 6), et la taille de l'élément 10 cm.

Les caractéristiques physiques et mécaniques de la maçonnerie en *Rose des Sables* obtenues par les diverses expériences discutées précédemment ont été utilisées et rapportées dans le tableau 13. En particulier, le module d'élasticité choisi est celui de la maçonnerie à l'échelle 1 : 2, car cette échelle est la plus proche de l'échelle réelle (1 : 1), (Mohammed et al., 2011). Une analyse de sensibilité a été réalisée pour définir les limites appropriées pour la valeur de la résistance à la traction de la maçonnerie. Une bonne interprétation du comportement étudié sur site est trouvée pour une résistance à la traction comprise entre 0,05 et 0,11 MPa. Ces valeurs, qui sont remarquablement inférieure à celle trouvée lors des essais de traction indirecte, peut être raisonnablement liée à la précision de la mise en œuvre de la maçonnerie elle-même sur site, éventuellement inférieure à celle des éprouvettes, et au processus de mise en œuvre légèrement différent, coulé plutôt qu'en couches. En outre, les effets d'échelle peuvent affecter la résistance à la traction résultante en plus du mode de rupture, autrement dit la fragilisation (Bazant & Cedolin, 1991).

Nom	Valeur
Classe de matériau	Béton et maçonnerie
Modèle de matériau	Modèle de fissure basé sur la déformation totale
Module d'Young	339 Mpa
Coefficient de Poisson	0.1
Masse volumique	1960 Kg/cm ²
Orientation de la fissure	Fixée
Courbe de traction	Fragile
Résistance à la traction	0.05 MPa
Résistance à la traction résiduelle	0.01 MPa
Réduction du coefficient de Poisson : modèle de réduction	Pas de réduction
Courbe de compression	Élastique
Fonction de rétention de cisaillement	Constante
Rétention de cisaillement	0.01

Tableau 13. Propriétés physiques et mécaniques de la maçonnerie en Rose des Sables utilisées pour la modélisation FE (l'auteure).

L'option isotrope élastique linéaire est prévue en compression, et un modèle de fissure fixe basé sur la déformation totale a été considéré pour le matériau de maçonnerie en traction. Les modèles de fissures basés sur la déformation totale suivent une approche étalée pour l'énergie de fracture. Les modèles de fissures étalées considèrent la fissuration comme un effet distribué avec directionnalité et le matériau fissuré est simulé comme un milieu continu avec des caractéristiques anisotropes. Un modèle constitutif basé sur la déformation totale décrit la contrainte en fonction de la déformation. Selon la fissuration contrainte-déformation fixe, les relations contrainte-déformation sont évaluées dans un repère fixe qui est fixé lors de la fissuration. Fondamentalement, les directions des fissures « *n s t* » sont fixes par rapport aux directions principales du vecteur déformation de l'élément. Le concept de base des modèles de fissures de déformation totale est que la contrainte est évaluée dans les directions qui sont données par les directions de fissure. Le vecteur de déformation ε_{xyz} dans le repère d'élément *xyz* est mis à jour avec l'incrément de déformation $\Delta_{\varepsilon_{xy}}$ et est

transformé en vecteur de déformation dans les directions de la fissure avec la matrice de transformation de déformation, fixé lors de la fissuration et déterminé au début de la fissuration. La matrice de transformation de déformation est déterminée en calculant les vecteurs propres du tenseur de déformation. Le modèle constitutif est alors formulé dans le repère de la fissure(DIANA FEA, 2009).

En ce qui concerne les propriétés non linéaires en traction de la maçonnerie, le comportement fragile est choisi pour la courbe de traction, car un ramollissement négligeable sous charge de traction est associé généralement à la maçonnerie en pierre (Como, 2015), Le comportement fragile du matériau est boosté au springer de coupole en raison de la présence de la discontinuité géométrique de la maçonnerie. Dans toutes les analyses FE réalisées, les conditions aux limites du modèle concernent la base des murs, en fixant les déplacements et libérant les rotations dans les trois directions. Le modèle de maillage numérique final était composé de 22 288 éléments solides 3D (figure 117). Le poids mort a été appliqué en spécifiant la direction de l'accélération gravitationnelle et la densité de la maçonnerie (tableau 13). Concernant le paramètre « Ensemble de charge : cas de charge géométrique », la charge globale dans le cas présent est la gravité. Ainsi, l'exécution des étapes de charge dans les analyses non linéaires est spécifiée par l'application d'étapes incrémentales de taille 0,05 de gravité.

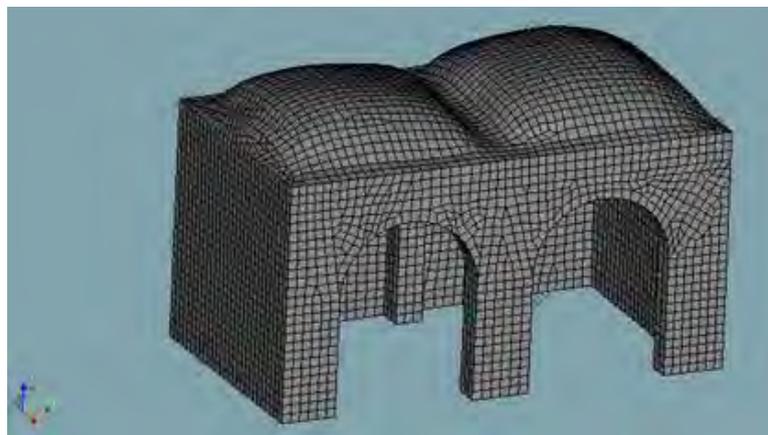


Figure 117. Modèle numérique du maillage sur DIANA FEA, (l'auteure).

- *Résultats de l'analyse statique linéaire*

Sur la base de diagnostic préliminaire rapportée dans les sections précédentes (Supra chapitre 3), une analyse statique linéaire a été réalisée, dont la simulation visait à identifier l'effet induit par les actions de gravité. Les résultats de l'analyse statique

linéaire en termes de déplacements dans la direction Z sont reportés sur la figure 118. La valeur de déplacement maximale enregistrée est de 0,94 mm et elle est située dans la zone centrale du système de toiture du modèle (en couleur bleue). La zone la plus déplacée comprend les deux moitiés connectées des coupoles et la partie centrale de l'arc qui relie les deux cellules.

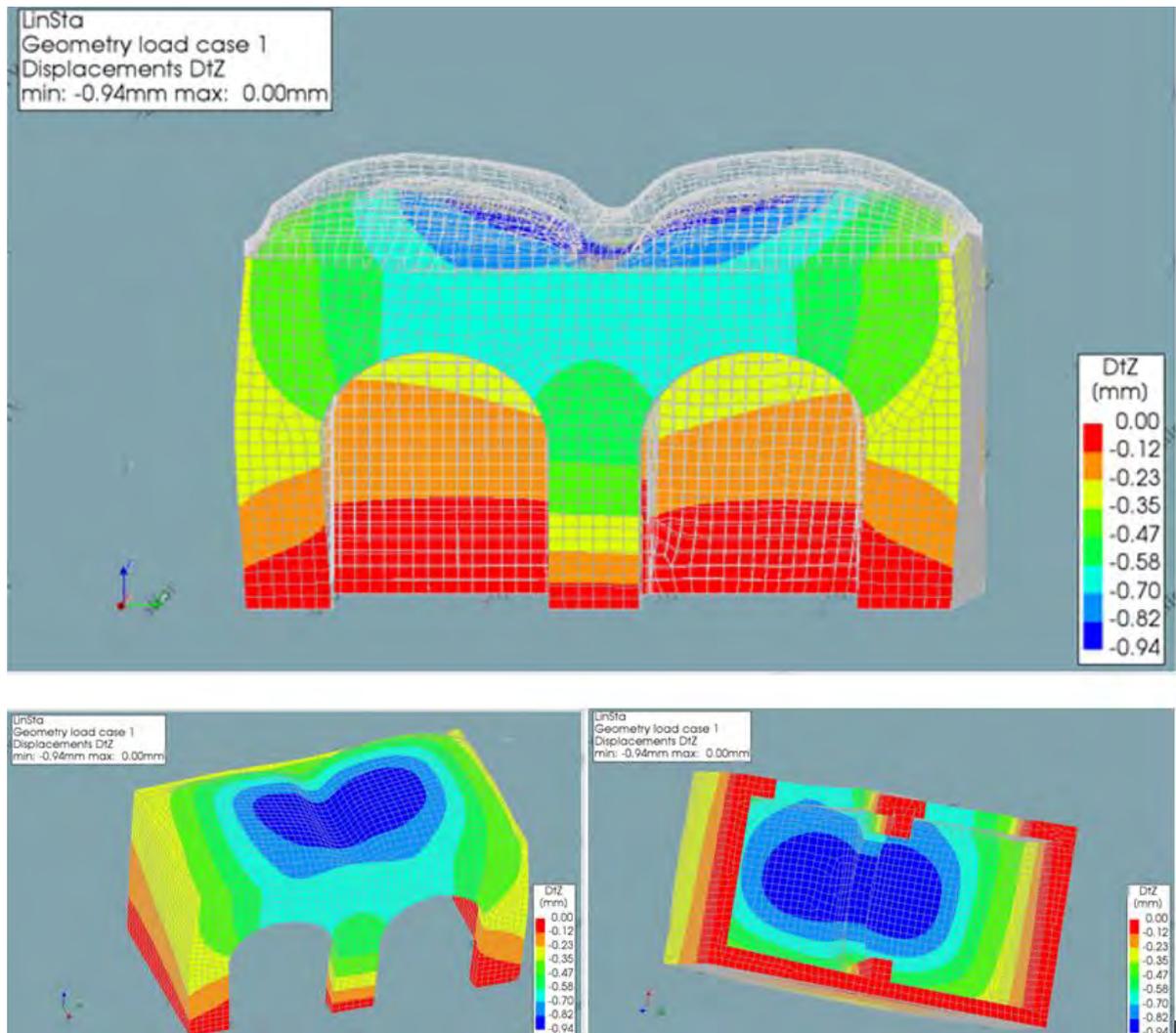


Figure 118. Diagramme de contour pour les déplacements dans la direction Z pour le poids mort, (l'auteure).

Les résultats en termes de contrainte dans les éléments, concernant le composant principal normal par rapport au plan de coupe, sont reportés sur les figures 119, 120 et 121. Les figures montrent différents plans de coupe du modèle, qui permettent de voir la contrainte dans différentes sections verticales et horizontales importantes. Premièrement, sur la figure 119, les coupes verticales, qui passe par les médianes de la coupole dans les directions longitudinale et transversale du modèle, mettent en évidence que la contrainte de traction maximale dans la direction orthogonale au plan de coupe

est recodée à la clé des arcs, avec des valeurs plus élevées pour l'arc qui joint les deux cellules, où il est enregistré la valeur de 0,092 MPa (en couleur rouge). La valeur de contrainte de compression maximale est de -0,045 MPa, qui est enregistrée dans la partie haute de la section de la coupole (en bleu). Les résultats présentés sur la figure 119.a& b montrent que les parties supérieures des coupoles subissent une contrainte de compression négligeable. A l'inverse, à la base des coupoles (springer) et dans la zone supérieure externe des murs porteurs, plus influencés par la présence de coupoles, une contrainte de traction est développée (en couleur verte), soit 0,0015 MPa dans la section transversale (Figure 119.a) et 0,023 MPa dans la section longitudinale (Figure 119.b). Il est important de mentionner que la coupe transversale, figure 119.a, montre que les parois longitudinales présentent des contraintes de traction faible le long de la normale au plan de coupe, c'est-à-dire dans la direction horizontale. Au contraire, la coupe longitudinale, figure 119.b, montre que les parois transversales sont sensiblement déchargées, à l'exception des parties supérieures externes des parois où se développe une contrainte de traction.

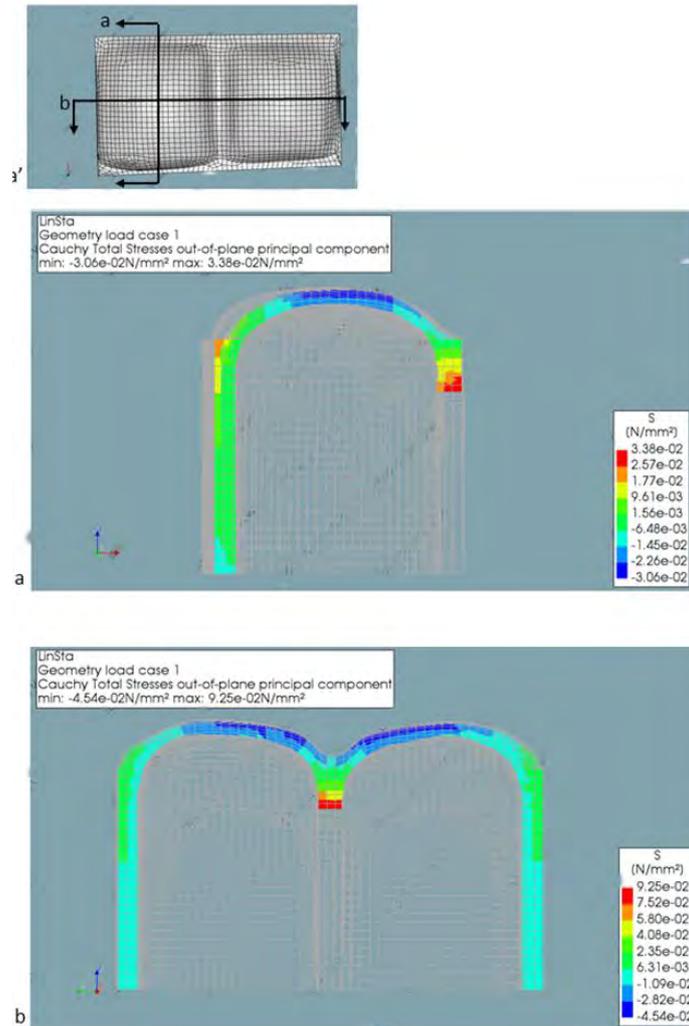


Figure 119. Graphiques de contour des contraintes principales de Cauchy, coupes verticales passant par les médianes de la coupole : a dans le sens transversal. b. dans le sens longitudinal, (l'auteure).

Sur la figure 120, une coupe verticale formant 45 degrés avec les directions XY (le long de la diagonale de la coupole) met en évidence la limite entre le cerceau des compressions et celui des tensions. Une contrainte de traction particulièrement le long de la normale au plan de coupe se développe à la fois dans la partie inférieure de l'intrados de la coupole, en conséquence avec les images précédentes, et dans la partie interne de la connexion entre la paroi et la coupole, figure 4.30b. Les valeurs calculées par l'analyse statique linéaire montrent que les valeurs de tension de pointe vont de 0,0189 à 0,027 MPa, tandis que dans la partie haute de la coupole, la contrainte de compression de -0,03 MPa est enregistrée.

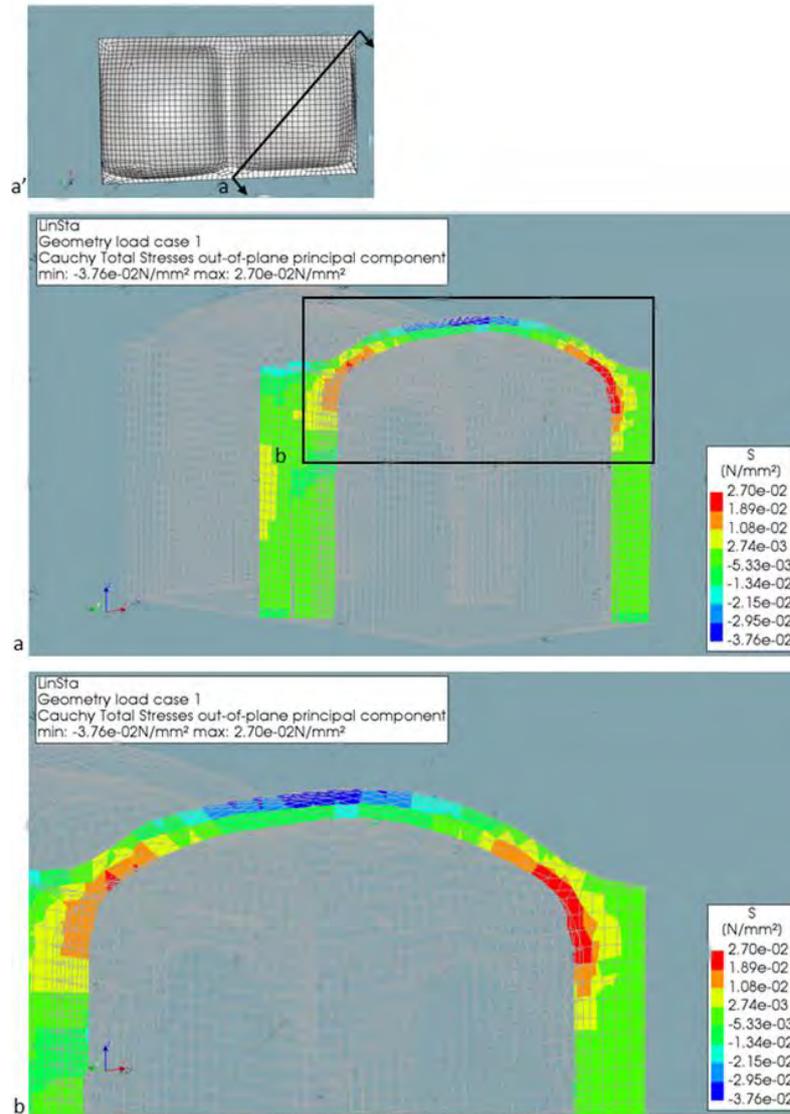


Figure 120. Tracé de contour des contraintes principales de Cauchy, coupe verticale dans la direction diagonale de la coupole, (l'auteure).

Concernant la section horizontale (figure 121), qui est prise au niveau de la liaison coupole-paroi, $z = 2,55\text{m}$, la présence de la contrainte de traction dans la direction orthogonale au plan de coupe est enregistrée pour la zone colorée en rouge. En particulier, la contrainte de traction se retrouve dans la partie externe : des angles du modèle ; le milieu des bords de chaque cellule, et pour presque toute la partie externe de la paroi arrière longitudinale. Toutes ces pièces ont des valeurs de contrainte de traction similaires, ne dépassant pas 0,004 MPa. Le reste des pièces montre un état de contrainte de compression, avec une valeur maximale atteignant -0,041 MPa.

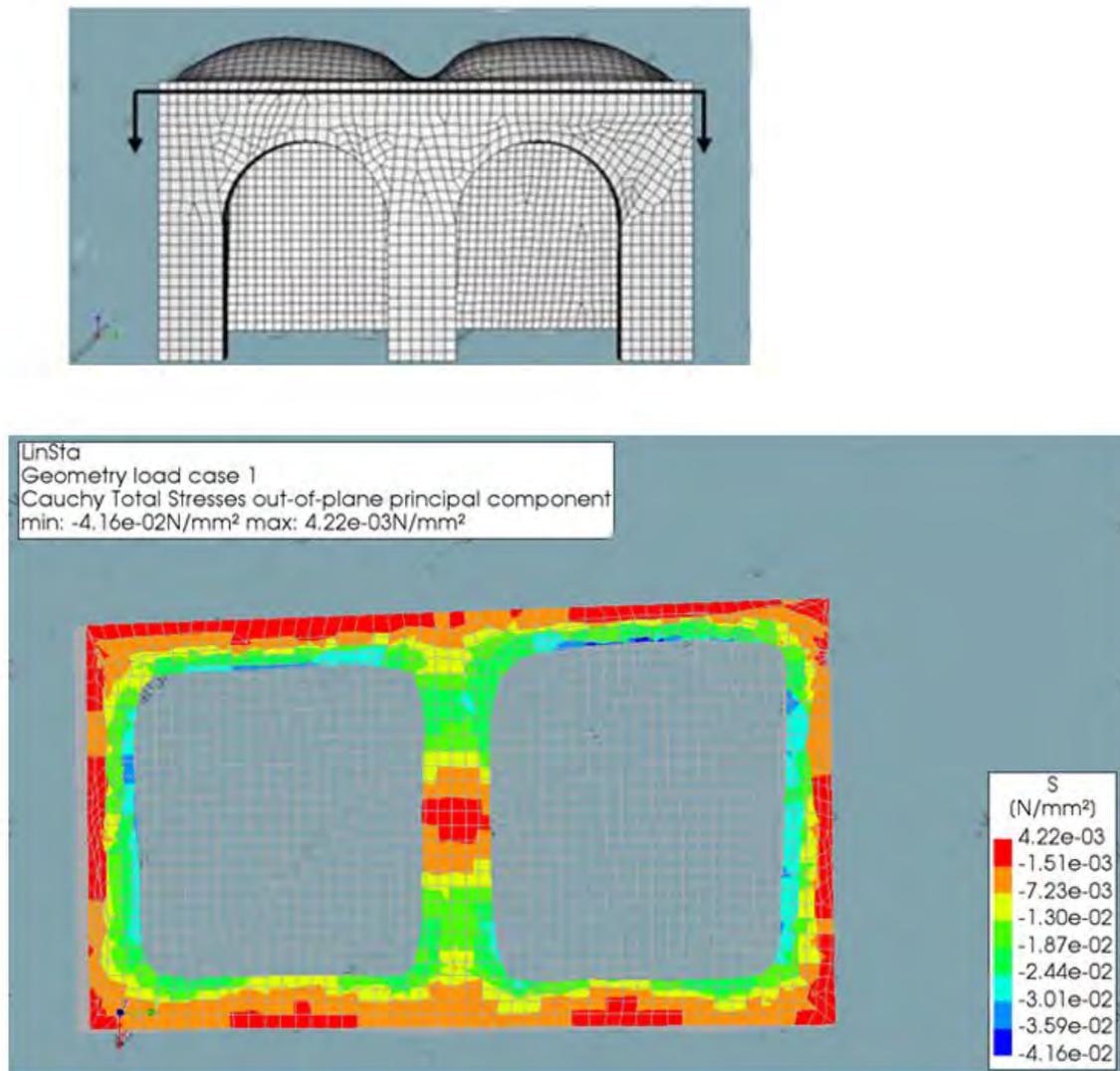


Figure 121. Tracé de contour des contraintes principales de Cauchy, coupe horizontale à la base des coupes, (l'auteure).

La figure 122 montre les principales composantes de contrainte dans le plan pour les éléments finis externes. Grâce à cette inspection, le flux de contrainte de compression est clair, de la partie supérieure des coupes aux parois. Les valeurs de contrainte de compression sont comprises entre -0,2 MPa (lignes bleues) et -0,036 MPa. La contrainte de traction critique est développée aux clés des arcades. En particulier, la valeur maximale de la contrainte de traction est enregistrée pour l'arc qui joint les deux cellules (lignes rouges) 0,12 MPa, tandis que pour les arcs d'entrée la valeur de 0,08 MPa est trouvée. La faible contrainte de traction, comprise entre 0,004 MPa et 0,045 MPa (lignes jaunes), concerne la zone délimitée par la partie médiane basse des coupes, réunie avec la partie médiane haute de la paroi.

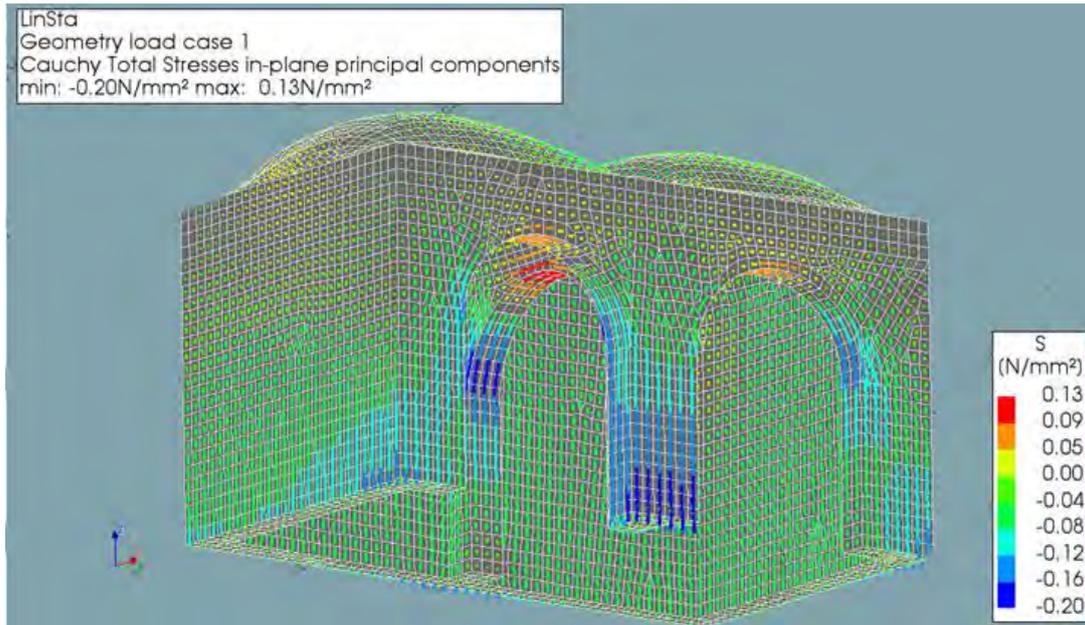


Figure 122. Diagramme de tension des principales composantes de contrainte dans le plan, (l'auteure).

Afin de comprendre la répartition des principaux composants à l'intérieur des éléments, différentes coupes verticales et horizontales sont réalisées dans des positions importantes, figure 123. En particulier, des coupes transversales et longitudinales permettent de mettre en évidence l'écoulement de poussée dans les médianes de la coupole dans ces deux directions. Les principaux composants de compression dans les sections de coupole montrent des valeurs comprises entre -0,003 MPa et -0,047 MPa dans la section transversale (Figure 123.a), et entre - 0,005 MPa et -0,052 MPa dans la section longitudinale (Figure 123.b). De plus, la contrainte de compression est plus élevée (lignes vertes) à l'extrados sur le dessus, et à l'intrados au springer, suggérant ainsi la forme de la ligne de poussée.

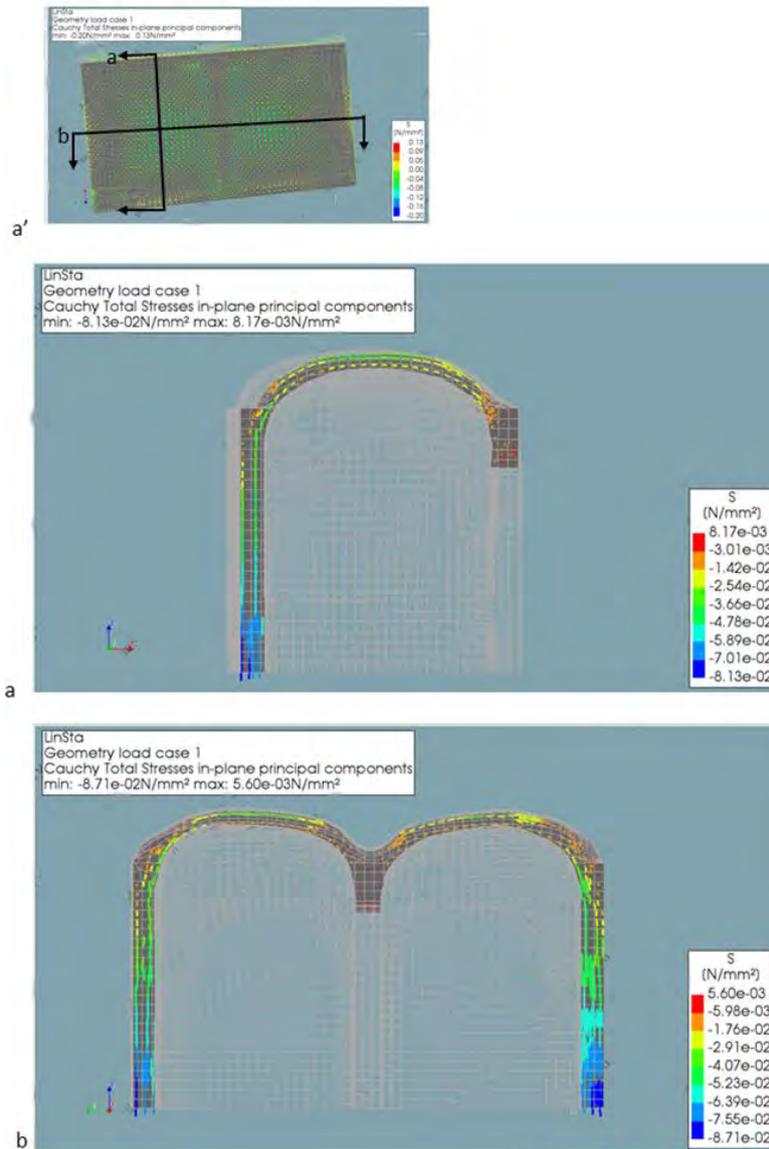


Figure 123. Diagrammes de tension des composantes de contrainte principales dans le plan, coupes verticales dans les directions transversale et longitudinale, à travers les médianes de la coupole, (l'auteure).

Sur la figure 124, qui représente la répartition des composants principaux à l'intérieur des éléments dans la section diagonale de la coupole, met en évidence que de légères composantes de traction sont détectées dans les éléments de la partie basse de la coupole de section (lignes rouges), figure 124.c. Ceci est lié au fait que le flux de poussée présente une inclinaison marquée par rapport à la ligne verticale. Par conséquent, les effets de glissement de cisaillement peuvent être distingués au niveau du springer, et la composante principale de traction de la contrainte atteint la valeur locale de 0,017 MPa. Concernant la partie haute de la coupole, les composants compressifs sont compris entre - 0,054 MPa et -0,006 MPa (lignes orange et jaune).

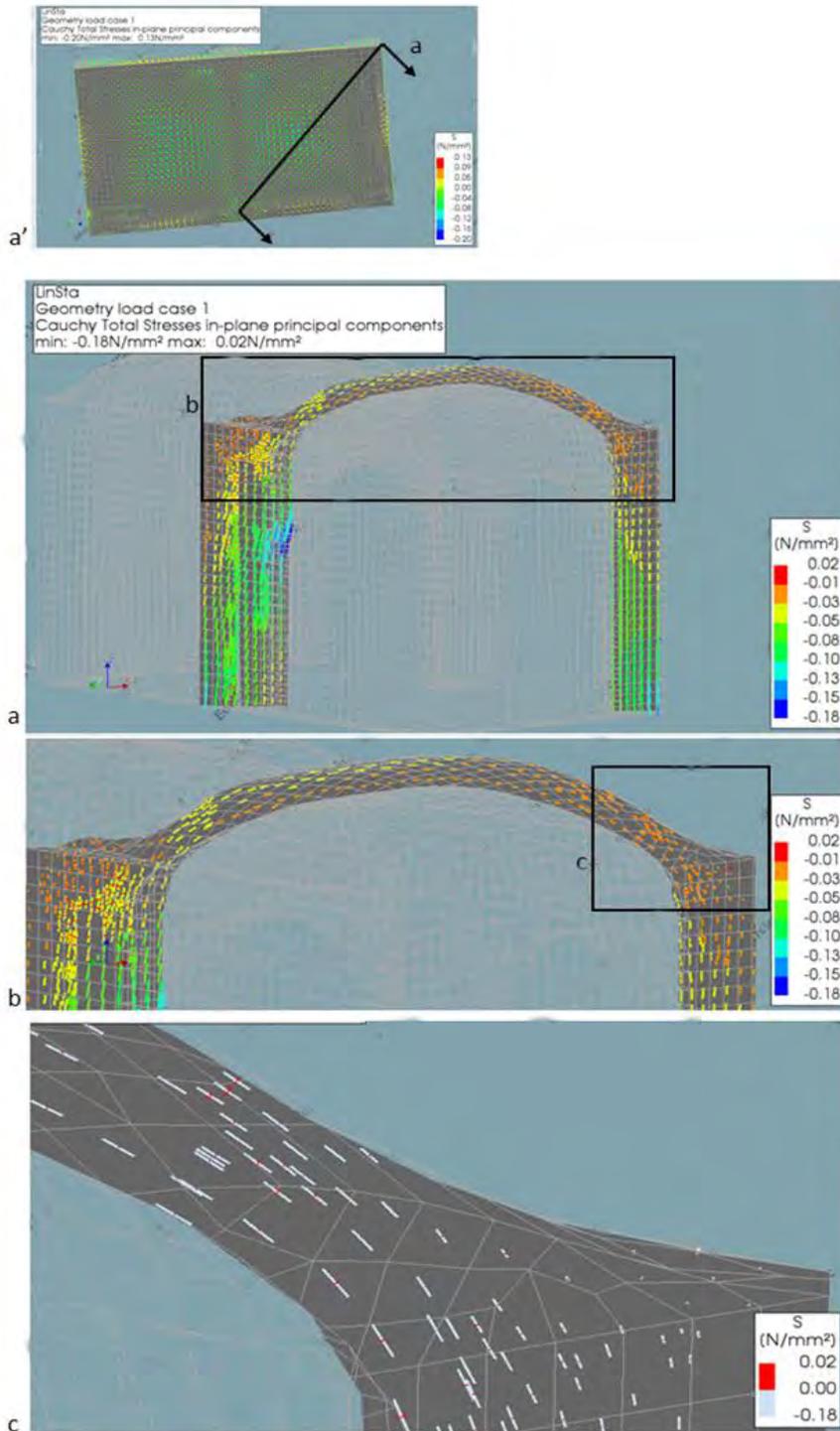


Figure 124. Diagramme de tension des composantes de contrainte principales dans le plan, coupe verticale dans la direction diagonale de la coupole, (l'auteure).

Concernant la section horizontale (Figure 125), qui est prise au niveau de la connexion coupole-paroi, $z = 2,55\text{m}$, la présence des éléments de traction est enregistrée aux angles, en traits rouges (Figure 125.c), et la direction est perpendiculaire à la ligne bissectrice de l'angle définissant le coin. Cela suggère que la direction de la traction au

coin est orientée vers les deux murs. Sa valeur est de 0,038 MPa. Perpendiculaire à ces composants de traction, des composants de compression (lignes bleu clair) sont enregistrés. Ils représentent l'effet de la poussée de la coupole dans le sens diagonal, la valeur est comprise entre - 0,014 MPa et -0,005MPa.

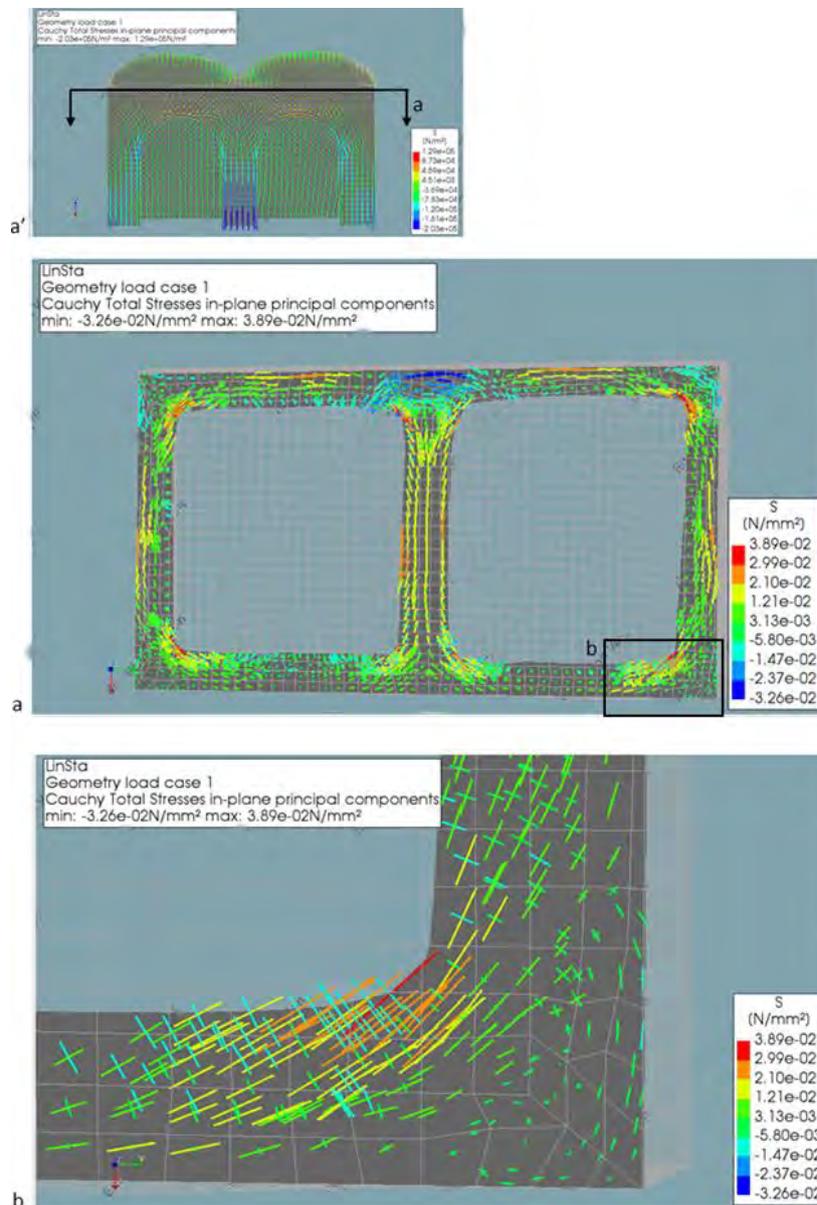


Figure 125. Diagramme de tension des composantes de contrainte principales dans le plan, coupe horizontale à la base des coupoles, (l'auteure).

Les résultats des investigations numériques à travers l'analyse linéaire statique ont offert des informations utiles pour comprendre le comportement structurel d'une telle typologie. Les résultats de l'analyse statique linéaire montrent la justification des différents dommages observés in situ (Supra chapitre 3). Les résultats permettent de confirmer l'hypothèse proposée. Dans un premier temps, les éléments de traction

enregistrés dans les coins des murs, où la traction est orientée vers les deux murs (Figure 125), permettent la formation de fissures dans la partie supérieure du mur (cas 3 de la figure 69, Supra chapitre 3). La possibilité de formation de ces fractures s'explique également par la contrainte de traction développée dans la partie angulaire de la liaison entre la paroi et la coupole (Figures 120). De plus, ces fractures sont liées aux fractures diagonales de la coupole (cas 1 et 2 sur la figure 69 & 70, Supra chapitre 3), qui sont également causées par la contrainte de traction développée dans la partie basse de la section de la coupole (Figure 120). En outre, les composantes de contrainte de traction dans le plan enregistrées dans la partie basse de la coupole diagonale s'ajoutent au scénario (Figure 124.c). La position et la tendance caractéristique des lésions dans la coupole confirment la tendance des écoulements de compression dans le plan des diagonales, qui convergent aux angles à travers la structure avec de remarquables éléments de glissement en cisaillement. Pour les composantes de contrainte dans le plan le long de la diagonale, la contrainte de traction au niveau du *springer* se forme clairement dans la direction normale à la diagonale, provoquant le cisaillement de la base de la coupole, qui pousse alors les parois vers l'extérieur.

On peut noter également la présence des composants de traction dans la partie supérieure des arcs (Figure 122), en particulier l'arc qui relie deux cellules (Figure 119) où une valeur élevée de contrainte de traction est enregistrée 0.092MPa, ce qui cause la fracture importante observée *in situ* (cas 5 et 6 de la figure 69, Supra chapitre 3). Il est important de noter également que le déplacement maximal en direction Z est enregistré dans la partie de l'arc qui relie les deux cellules (figure 118).

La contrainte de traction développée au centre de la partie supérieure des parois transversales (Figure 121), accompagnée de la présence des composants de traction dans la partie centrale inférieure des coupoles (Figure 122, lignes jaunes) peut expliquer la fracture verticale observée sur place (cas 4 sur la figure 69, Supra chapitre 3). Cela peut expliquer aussi les effondrements qui laissent souvent la forme d'une cavité circulaire, qui a été noté au milieu des murs (Figure 82 Supra chapitre 3). On observe *in situ* que cette fracture verticale est moins importante que les fractures diagonales. Les résultats des analyses FEM démontrent que la contrainte de traction enregistrée dans la direction orthogonale aux diagonales de la coupole et aux coins est relativement plus élevée par rapport à celle enregistrée au milieu de la paroi et de la coupole. La contrainte de traction observée dans la quasi-totalité de la partie externe de la paroi

longitudinale des deux cellules (Figure 121) pourrait être à l'origine de l'effondrement de cette paroi et d'une partie des deux coupes, qui sont soutenus par cette paroi, comme elle est mentionnée dans le chapitre 3 (Figure 78).

- *Résultats de l'analyse statique non-linéaire*

La figure 126.a montre les déformations de fissures pour l'échelon de charge égal à 0,84 g. Les déformations maximales de fissures sont recodées dans l'arc qui relie les deux cellules, $5.77e-3$, et d'autres fissures se développent dans les arcades des portes. La figure 126.b montre l'apparition de la fissure dans les angles des cellules selon le facteur de charge de 0,93g, avec une valeur des déformations de fissures comprise entre $1,45e-4$ et $8,69e-4$. Sur la figure 126.c les déformations de fissures pour un échelon de charge égal à 1,17g sont montrées, les différentes fissures dans les angles (valeur des déformations de fissure entre $1,17e-4$ et $1,11e-3$) et les arcs de clés (valeur maximale des déformations de fissures $8.08e-3$) se distinguent clairement. La figure 127 montre la largeur des fissures, qui estiment la valeur de la largeur de la fissure, enregistrée pour les échelons de charge 0,93g et 1,13g.

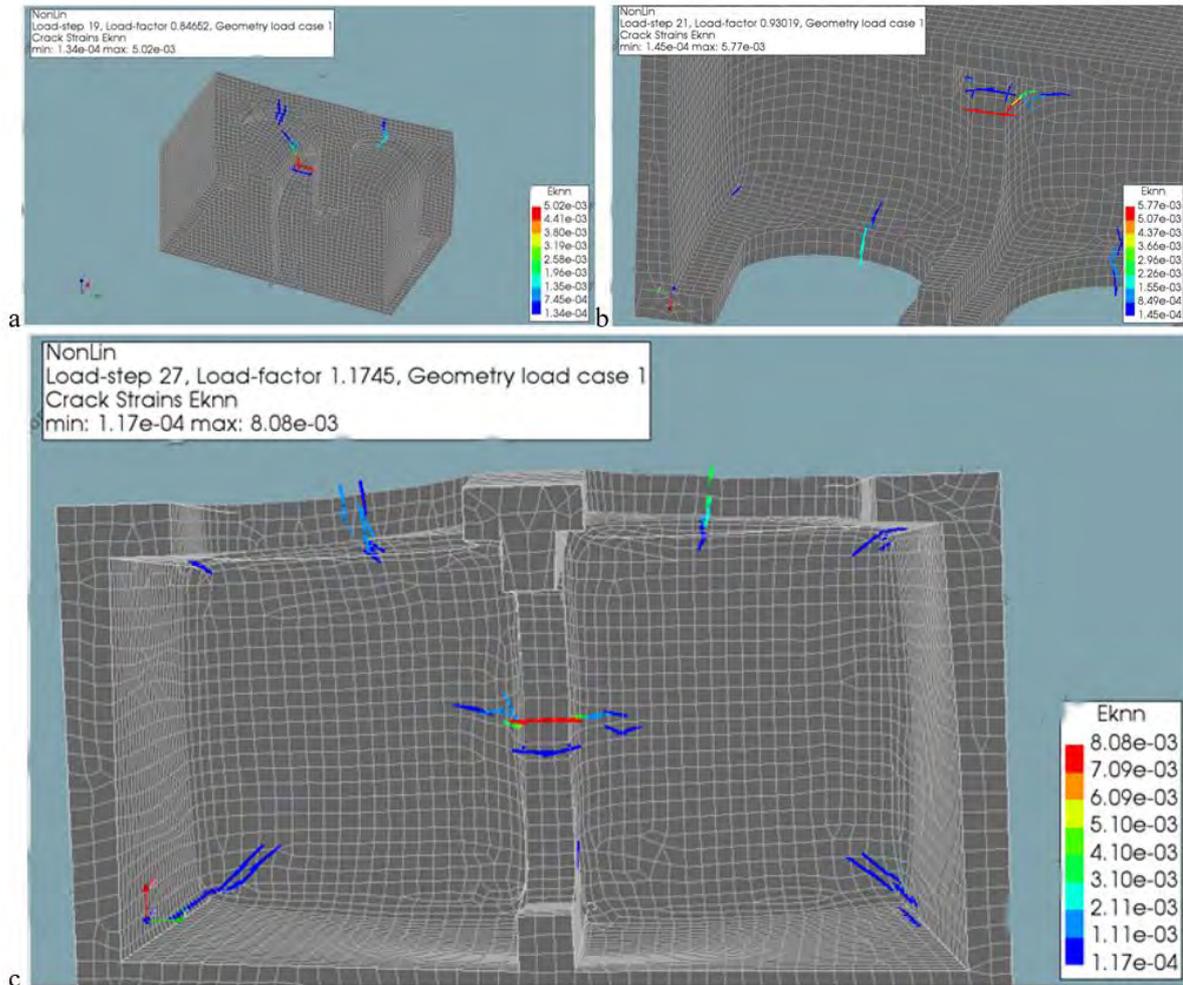


Figure 126. Résultat de l'analyse non linéaire FEM: Distribution des déformations de fissures dans le modèle: a. pour le pas de charge de 0,84 ; b. pour l'échelon de charge de 0,93 11. c. pour l'échelon de charge de 1,17, (l'auteure).

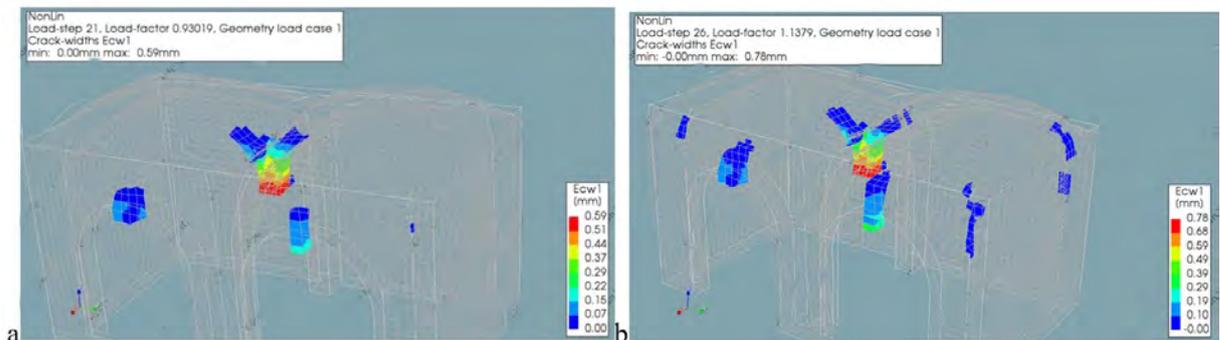


Figure 127. Résultat de l'analyse non linéaire FEM: les largeurs de fissures dans le modèle pour le pas de charge a: 0,93g; b. 1,13, (l'auteure).

Pour une résistance à la traction de la maçonnerie égale à 0,11 MPa, la figure 128 montre les déformations de fissures développées dans le modèle. Les seuls modèles de fissures se trouvent au niveau de l'arc, et ils sont enregistrés pour les échelons de charge égaux à 0,9 g. De plus, la valeur maximale de la déformation de fissures est de $4,9e-3$.

La figure 4.38.b, montre la largeur des fissures, enregistrée aux mêmes échelons de charge 0,90g et 1,13g.

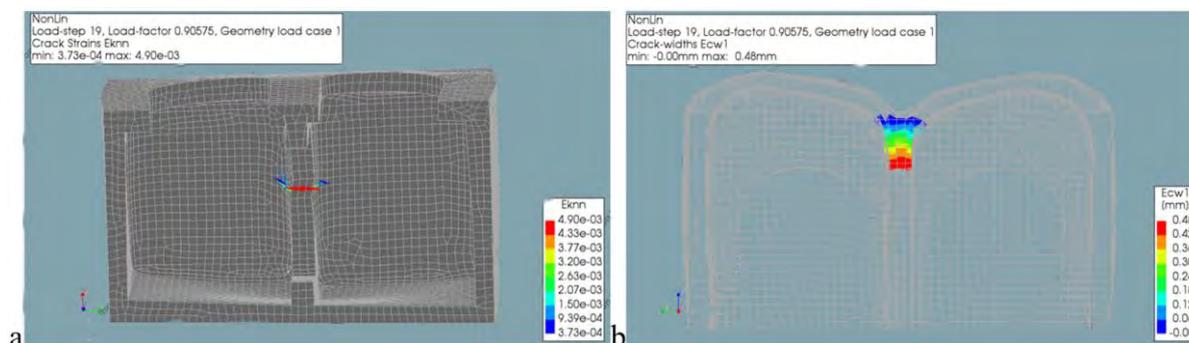


Figure 128. Résultat de l'analyse non linéaire FEM : a. Répartition des fissures dans le modèle pour l'échelon de charge 0,9g. b. Largeurs des fissures dans le modèle pour l'échelon de charge 0,9 g (l'auteure).

Les résultats de l'analyse non linéaire confirment les résultats de l'analyse linéaire statique. Ceci par l'obtention du modèle de configuration de fissure similaire à celui observé pour cette typologie *in situ* et déjà discuté (Supra chapitre 3), pour un intervalle de résistance à la traction comprise entre 0,05 MPa et 0,11 MPa. Pour la résistance à la traction la plus élevée, 0,11 MPa, les fissures n'ont pu être observées qu'au niveau de la clé d'arc qui relie les deux cellules. Pour une résistance à la traction inférieure, 0,05 MPa, le motif de fissure attendu a été obtenu à partir d'échelon de charge égal à 0,42 g, exactement au niveau de la clé de l'arc. De plus, le motif de fissure au coin est enregistré à partir d'échelon de charge égal à 0,93 g. L'obtention de tout le motif de fissure attendu est d'échelon de charge égal à 1.1g, cela est probablement due à la résistance à la traction si la réalité est inférieure à celle calculée et utilisée dans l'analyse en raison de la présence de la vraie discontinuité géométrique dans le soulèvement des couches de la coupole. En comparant les résultats obtenus à travers les deux valeurs de la résistance à la traction, on peut noter que la zone la plus vulnérable est la clé de l'arc, et les fissures observées en diagonale des coupoles pourraient être générées par différentes raisons. En particulier, la présence des zones faibles liées à la discontinuité de la géométrie des coupoles, qui pourrait générer la fissure, en plus de la typologie des coupoles, qui présente un profil bas, et donc, ce n'est pas un choix géométrique optimal pour les matériaux utilisés. De plus, la discontinuité géométrique et l'exécution d'une telle architecture vernaculaire, qui est caractérisé par des irrégularités de forme et de matériaux, pourraient participer à l'apparition des dommages. Surtout, l'irrégularité de

la forme des coupoles est très perceptible, dont son profil n'est pas symétrique, et ce fait pourrait clairement aggraver l'évolution des dommages.

Les résultats de l'analyse non linéaire permettent de montrer les principales fractures de cette typologie, qui sont la fracture dans la clé de l'arc, qui relie les deux cellules à coupoles, aux angles des parois et à la diagonale des coupoles. La condition la plus dangereuse de la coupole est aux diagonales et aux coins de sa base (la partie haute du mur). La forte épaisseur de la fracture dans l'arc de clé qui joint deux cellules (Supra chapitre 3) est expliquée dans les résultats de l'analyse non linéaire, qui montre que la largeur de fissure importante enregistrée dans le modèle se situe au niveau de cet arc de clé. Ces principales fissures sont à l'origine des différents effondrements évoqués dans le diagnostic préliminaire, comme l'effondrement de la moitié de la coupole à travers sa diagonale (Figure 77, Supra chapitre 3), et notamment l'effondrement des parois longitudinales des deux cellules à coupoles et les parties des coupoles qu'elles supportent (Figure 78, Supra chapitre 3).

3. Conclusion

Une étude multidisciplinaire a été menée sur les constructions en *Rose des Sables* les plus vulnérables de la région du *Souf*, afin de protéger cette architecture vernaculaire et de sauvegarder son patrimoine. Cette étude multidisciplinaire a permis d'évaluer la vulnérabilité du cas d'étude sélectionné à la base de diagnostic préliminaire, sur deux échelles à savoir : l'échelle de la maçonnerie et à l'échelle de la construction. L'évaluation de la vulnérabilité de la construction a permis de confirmer les hypothèses proposées dans le diagnostic préliminaire, dont l'origine fondamentale des pathologies recensées est liée aux aspects structurels de cette typologie architecturale vernaculaire.

Ainsi, les résultats obtenus de l'évaluation de la vulnérabilité se résument comme suite :

Concernant le comportement des matériaux de constructions, les différentes investigations expérimentales ont servi à déterminer les différents paramètres physico-chimique et mécanique de la maçonnerie et de ses composants. D'une part, les caractéristiques minéralogiques des composants de la maçonnerie (la pierre de la *Rose des Sables* et le gypse) ont montré la présence d'une parfaite adhérence entre les blocs

et le mortier à cause des similitudes dans la composition minéralogique de ces deux matériaux. Entre autres, se trouve une excellente cohésion entre les blocs et le mortier, couplée au durcissement rapide du mortier, que les éléments de maçonnerie ont des capacités structurelles exploitables. D'autre part, les nombreuses expérimentations mécaniques sur les composants de la maçonnerie et la maçonnerie elle-même, ont montré une complexité reliée à la variation de ces paramètres. Cette variation est due aux plusieurs facteurs qui ont effet sur le comportement de la maçonnerie, à savoir : la porosité élevée et variée de la pierre de la *Rose des Sables*, et il est observé que cette porosité diminue les valeurs de ses paramètres mécaniques. De même, l'irrégularité et l'hétérogénéité de la maçonnerie à cause des blocs de pierres ainsi que, les surfaces d'adhérence entre les blocs et le mortier, de plus de la composition hétérogène de gypse peuvent augmenter la vulnérabilité de cette construction. Les expérimentations ont montré aussi que les paramètres mécaniques de la maçonnerie sont relativement bas. Cette démonstration est déjà proposée et qui est basé sur les règles d'art qui ne sont pas respecté dans le cas présent. Cela permet de confirmer que certains phénomènes de dégradations sont dus à la qualité de la maçonnerie historique en *Rose des Sables*.

En ce qui concerne le comportement structurel, les résultats des différentes expérimentations ont été exploités dans la simulation de comportement structurel des modèles. D'abord, une évaluation préalable du comportement structurel d'une coupole isolée a permis de mettre en évidence que les zones de faiblesse sont dans la partie inférieure des arcs diagonaux. En effet, dans ces zones, toutes les voûtes en arc de cloître sont typiquement affectées par des efforts de traction. De plus, dans le cas des coupoles en *Rose des Sables*, les mauvaises propriétés mécaniques associées à une texture irrégulière des parois aggravent la faiblesse intrinsèque. Le modèle FE, avec le choix spécifique des conditions aux limites, visait à reproduire cette faiblesse, c'est-à-dire un état fissuré des parois orthogonales supportant la coupole. Aussi, dans le cadre de l'analyse limite, l'analyse statique d'une tranche médiane de la coupole a été envisagée et compte tenu de la pente de la dernière branche de la ligne de poussée, il est raisonnable de s'attendre à un mécanisme de rupture composé impliquant également les murs porteurs. Ces considérations permettent d'étudier la distribution des contraintes le long des parallèles et de mieux interpréter les modèles de fissures répandus observés.

Ensuite, l'évaluation de comportement structurel sur un modèle composé de deux cellules à coupoles par des analyses élastiques linéaires et non linéaires a permis encore

de confirmer les zones des vulnérabilités structurels quant à l'origines des fissures observées. D'abord, l'analyse linéaire a permis de souligner les zones de traction dans la structure et qui sont similaires à celle de profil de fissuration observée. Cela est confirmé totalement par les résultats de l'analyse non linéaire, ceci par l'acquisition du modèle de configuration de fissure similaire à celui observé pour cette typologie *in situ* et déjà discuté. Il est important à noter que la zone qui présente des faiblesses est la clé de l'arc, et les fissures observées en diagonale des coupoles pourraient être générées par différentes raisons. En particulier, la présence des zones vulnérables liées à la discontinuité de la géométrie des coupoles et qui pourrait créer la fissure. Ainsi le choix géométrique de typologie des coupoles et son profil bas ne sont pas optimaux pour la maçonnerie en *Rose des Sables*. Vu que le modèle utilisé est obtenu par un relevé 3D par laser scanner ce qui a permis d'avoir une forme exacte des coupoles et prendre en considération son irrégularité. Cela a permis de montrer que la discontinuité géométrique et l'exécution d'une telle architecture vernaculaire a contribué à l'apparition des dommages ou aggraver son évolution. En plus, l'apparition d'effondrement à cause des fissures revient au manque d'entretien permanent de cette architecture, et aux aléas naturels liées aux conditions climatiques qui participent avec les problèmes structurels a augmenté la situation des dommages. Le manque d'entretien revient aux aléas anthropiques qui sont les menaces liées aux changements sociaux, économiques et culturelles complexes, dont l'analyse ne fait pas le but de la présente recherche. Essentiellement, Avec le succès des mutations absolument légitimes dans les modèles de logement, et les cultures de construction traditionnelles ne sont pas convenues comme un avantage et deviennent incapables de résister à la diffusion des technologies modernes standardisées.

Conclusion : Synthèse des Résultats Obtenus

1. Synthèse des résultats et des travaux réalisés

La présente recherche a porté sur la définition d'une démarche méthodologique de diagnostic structurel du patrimoine architectural vernaculaire de la région du *Souf* en Algérie, en vue d'une meilleure préservation de ce dernier. Sa structure est faite avec les matériaux de construction locaux à savoir : la pierre de la *Rose des Sables* et le gypse préparé à partir de la pierre de *Tafza*. Les toits en coupole dépeignent un paysage urbain remarquable, en même temps, ils sont l'élément le plus vulnérable du système structurel. Ces coupoles présentent des fissures et des effondrements répandus qui dévalorisent ce patrimoine architectural. Donc, La mise au point de la démarche méthodologique s'est appuyée sur le cas de l'architecture vernaculaire résidentielle à coupole en *Rose des Sables* dans les oasis algériennes du *Souf*.

Pour atteindre cet objectif, nous avons essayé de considérer les aspects technico-scientifiques, ainsi que les aspects socioculturels qui distinguent le contexte dans lequel la recherche est insérée. En effet, pour mieux conserver et sauvegarder ce patrimoine, il est important de s'appuyer sur une approche multidisciplinaire, en considérant l'aspect technico-scientifique ainsi qu'historique et culturel. Cela nécessite un grand investissement dans la connaissance de la région du *Souf* et de son patrimoine, à travers l'analyse du contexte historique, urbanistique et patrimoniale de la région d'un côté, et la définition de la culture architecturale et constructive du *Souf* d'un autre côté.

D'abord, l'analyse du contexte historique, urbanistique et patrimoniale a permis de définir l'aire d'étude, le centre historique de *Guemar*, sa morphologie urbaine et architecturale. Notamment, les typologies significatives des maisons introverties avec une cour centrale, qui est entourée par une série de cellules à coupole, dont une cellule à coupole est considérée comme l'unité de base spatiale de la maison.

Ensuite, de plus de cette dernière analyse, il est aussi essentiel d'acquérir une connaissance approfondie du contexte architectural, ainsi que la culture constructive pour pouvoir aborder cette recherche. A cet effet, des investigations *in situ* ont été réalisées pour comprendre et documenter les composantes architecturales et

constructives ainsi que leur processus de construction. La réalisation de la documentation et la modélisation du processus de construction est basé sur une série de relevés métriques manuelle et par scanner laser (3D). De plus, des entretiens ont été menés avec certains habitants du centre historique *Guemar*, particulièrement avec les anciens maîtres dans le chantier de restauration de monument historique de ce centre, *Zaouia Ettidjania*.

Cela a servi à décrire la provenance des matériaux de constructions à connaître la pierre de la *Rose des Sables* et le mortier de gypse obtenue de la pierre de *Tafza* brûlé, leurs préparations et la méthode de réalisation de la maçonnerie en *Rose des Sables*, qui constitue un conglomérat. Cela est suivi par la description des éléments architecturaux et constructifs de l'unité de base de la maison et leur processus d'exécution. Les éléments sont : les fondations, les supports (murs porteurs), les contreforts, les ouvertures, enfin les franchissements qui sont constitués d'arcs et de coupoles (système de couverture). Une classification typologique a été élaborée pour les différents éléments de systèmes de couverture, en particulier le système le plus répandu, qui est la coupole. La typologie de la coupole la plus dominante est présentée dans le tissu traditionnel du centre, précisément les coupoles des maisons traditionnelles.

Cette architecture vernaculaire est caractérisée par une maçonnerie constituée avec des éléments extrêmement irréguliers, à savoir la pierre de la *Rose des Sables*, qui a généré des liaisons pierre-mortier irrégulier. Ces caractéristiques avec l'ajout d'autres paramètres, montrent que la maçonnerie en *Rose des Sables* n'est pas construite dans les règles d'art. L'irrégularité est également présente dans la forme des coupoles par l'asymétrie du profil de celle-ci, qui due à la qualité de l'architecture vernaculaire caractérisée par le travail de l'homme local sans instruction et le manque de main d'œuvre spécialisée. Dès lors, il est important de noter que ces coupoles présentent un nombre de défauts reliés à la mise en œuvre.

Pour atteindre l'objectif principal et élaborer un processus méthodologique de diagnostic, des investigations in situ ont été menées pour réaliser un diagnostic préliminaire. Premièrement, le travail a été commencé par le traitement de l'état de conservation et les menaces de l'architecture vernaculaire du *Souf*, en particulier l'architecture résidentielle vue qu'elle est la plus vulnérable. Ensuite, l'inventaire des pathologies constatées sur site a été réalisé. Ce travail a été élaboré à partir de

l'observation directe sur le site et les relevés 3D réalisés par le scanner laser. Il a été mis en évidence un profil de fissurations au niveau des coupoles typique de celle de voûte en arc de cloître, dont les diagonales de la coupole s'éclatent et les murs appuyés s'écartent vers l'extérieur au niveau des angles. En outre, des fractures ont été relevées au niveau des différents clés d'arcs, surtout l'arc qui joint deux cellules à coupoles. D'autres fissures de moindre importance ont été observées dans la zone centrale de la paroi et de la coupole. Il a été remarqué que plusieurs effondrements partiels ou généralisés ont été générés à cause de profil des fissurations avec une déformation de la maçonnerie. Concernant les pathologies, qui sont relevés au niveau du mortier et du plâtre, sont l'effritement, le gonflement, la dislocation et l'érosion de ces derniers. De même, des moisissures et efflorescence ont été observées à la base des constructions.

À partir de ces observations, un classement des pathologies a été établi, selon une analyse hypothétique afin de définir l'origine de ces dommages. En effet, le classement a défini l'origine des pathologies selon deux facteurs, à savoir : les facteurs internes et les facteurs externes (endogènes et exogènes). En premier lieu, l'ensemble des fractures et des effondrements ont été classées dans les pathologies dues aux facteurs internes, qui considère que les dommages ont une relation avec le comportement de la structure de la typologie de construction. En particulier, les fractures observées au niveau de la coupole sont reliées avec la forme géométrique et sa typologie relative, qui est similaire avec celle de voûte en arc de cloître. Ainsi, pour les murs porteurs de la coupole qui s'écartent vers l'extérieur, est probablement due à la traction développée au long des diagonales de la coupole. En outre, l'évaluation préliminaire de la maçonnerie montrent que les « règles de l'art » de la construction n'ont pas été respectés dans cette dernière, en conséquence, ses caractéristiques mécaniques pourront présenter des faiblesses dû au non-respect du chaînage et d'une mauvaise disposition des blocs de pierres par rapport à la ligne de pressions (non orthogonales).

En second lieu, l'ensemble des pathologies suivantes, à savoir : l'effritements, le gonflement, détachement, érosion de mortier et de plâtre de plus des moisissures et efflorescence, ont été classées dans les pathologies dues aux facteurs externes. Ce dernier a pour origine les aléas naturels qui sont relié aux conditions climatiques et les transformations aux sous-sols de la région, ainsi qu'au matériau utilisé le gypse, et sa nature notoirement fragile aux différentes altérations naturelles. Ces pathologies sont dues principalement à l'humidité, dont la source est la remonté capillaire de la nappe

phréatique. D'une part, cette humidité a été observée à l'aide de la caméra d'imagerie thermique, qui a souligné la présence de celle-ci au niveau des soubassements. De plus, les moisissures marquées au niveau de la coupole, coïncident exactement avec les traces des fissures, cela est probablement due à l'infiltration d'eau à travers ces fissures.

La liste des phénomènes de dégradation ainsi que la liste hypothétique d'origine des dégradations sont non exhaustives. Il est important de noter que les facteurs internes et externes peuvent participer ensemble à l'apparition des dégradations et dans certains cas de l'aggraver, autrement dit, l'origine des pathologies observées peut provenir de la combinaison de plusieurs causes ce qui rend la problématique délicate. Par ailleurs, afin de confirmer ou infirmer la liste hypothétique d'origine de dégradations, il est important de procéder à une analyse et une évaluation détaillée de la vulnérabilité des constructions. Cette analyse est caractérisée par la multidisciplinarité des approches utilisées, par conséquent, d'une diversité d'objets d'étude relative.

D'abord, des différentes études expérimentales sur la maçonnerie en *Rose des Sables* et ses composants visent à identifier les propriétés physico-chimique et mécanique des celles-ci. Ainsi elles permettent de définir les origines externes et internes des désordres enregistrés. Pour ces expérimentations, les matériaux qui font objet d'étude sont : la maçonnerie en *Rose des Sables*, ses composantes c'est-à-dire les blocs de pierre de *Rose des Sables* et le gypse, et la première matière du mortier qui est la pierre de *Tafza*. A cet effet, un ramassage sélectif des échantillons sur site a été effectué. La collecte de ces objets d'études regroupe : des blocs de pierres en *Rose des Sables* en différentes dimensions prises au niveau des maisons vernaculaire à *Guemar*, ainsi que des *morceaux* du mortier du gypse. Pour mener à bien des essais comparatifs, un complément de collecte de matériaux a été rajouté à la première qui se compose : des blocs de *Rose des Sables* avec du mortier attachées ; la pierre de *Tafza* prise au niveau des fours traditionnels de production de gypse ; *gypse* en poudre a été prise du chantier de restauration du monument historique *Zaouia Ettidjanja*.

Une série d'expérimentations ont été réalisées au niveau des laboratoires et *in situ*. D'abord, des analyses minéralogiques et pétrographiques ont été faite sur : des échantillons de pierre de *Rose des Sables*, des morceaux de mortier de gypse, des blocs de pierre en *Rose des Sables* avec du mortier attachée et de pierre de *Tafza*. Ensuite, les essais mécaniques à savoir : la compression uniaxiale, la traction indirecte, la flexion à

trois points et enfin le test par pénétromètre. Les résultats de ces essais ont permis de déterminer les paramètres mécaniques de ces matériaux qui ont servi à mieux connaître leur comportement, de faciliter leur expertise et leur diagnostic et finalement pour mieux caler le modèle (*input*).

En résumé, les analyses minéralogiques ont permis de mettre en évidence que, le principal composant dominant aussi bien dans les blocs que dans le mortier est le gypse. Cette caractéristique justifie la parfaite adhérence entre les blocs et le mortier comme le montrent clairement les analyses pétrographiques, réalisées par l'observation d'images de la section mince des échantillons constitués de blocs et de mortier obtenus à l'aide d'un microscope optique en lumière polarisée transmise. C'est précisément grâce à cette excellente cohésion entre les blocs de pierre et le mortier, couplés au durcissement rapide du mortier, que les éléments de maçonnerie ont des capacités structurelles (forces de liaison) exploitables. En outre, vu que le gypse (élément dominant), qui est par sa nature notoirement fragile aux différentes altérations naturelles, pourrait justifier les causes de dégradations liées aux aléas externes.

Cependant, les résultats des essais mécaniques de la maçonnerie et les composants de cette maçonnerie ont montré une complexité dans l'interprétation du comportement mécanique de cette composition. En effet, plusieurs facteurs participent à la détermination du comportement de la maçonnerie. Parmi ces facteurs : la nature de la pierre, caractérisé par une porosité élevée et variée d'un bloc à un autre ; l'hétérogénéité de la maçonnerie et sa texture irrégulière au niveau des surfaces d'adhérence entre les blocs et le mortier. Dès lors, les caractéristiques mécaniques de la maçonnerie sont relativement basses. En conséquence, les caractéristiques de la maçonnerie en *Rose des Sables* ne respectent pas les règles de l'art de la construction, ce qui est la raison d'apparition de plusieurs anomalies ayant causés des dommages dans les constructions. Cela pourrait être plus confirmé dans l'analyse numérique de comportement structurel du cas d'étude, dont les caractéristiques physiques et mécaniques de la maçonnerie sont exploitées.

Vu la nature de la maçonnerie, qui est constitué d'un conglomérat avec des composants similaires, la méthode des éléments finis a été choisi pour l'évaluation et la simulation numérique de comportement structurel des cas d'étude. Ces derniers sont d'abord, la coupole en *Rose des Sables* vu qu'elle est l'élément le plus vulnérable dans

la construction. Ensuite, un modèle constitué de deux cellules à coupole a été choisi vu les désordres observés à l'échelle d'une ou deux cellules à coupole articulée par un arc. Ce modèle a été relevé par le scanner laser 3D, ce qui a permis d'avoir une forme exacte de telle typologie de coupole avec son irrégularité et son asymétrie. Cela a pour objectif de prendre en considération des défauts liés à la mise en œuvre de cette architecture vernaculaire. En effet, le nuage de points a été traité et transformé en maillage, ensuite en solide pour finalement l'exploiter au niveau du logiciel de simulation structural. Les approches utilisées sont linéaires et non linéaires en mode statique, car la région du *Souf* est considéré stable du point de vue sismique.

Les résultats de l'analyse ont montré que les zones vulnérables de cette typologie structurelle, confirment les hypothèses quant à l'origine des désordres liées à la structure. L'évaluation préalable du comportement structurel d'une coupole isolée a permis de mettre en évidence que les zones de faiblesse sont dans la partie inférieure des arcs diagonaux. L'évaluation de comportement structurel sur le modèle de deux cellules à coupoles a permis encore de confirmer la présence des zones des vulnérabilités quant à l'origine des fissures observées. A travers l'analyse linéaire, il était souligné les zones de traction dans la structure, qui sont similaires à celle de profil de fissuration observée. Cela est autant confirmé par les résultats de l'analyse non linéaire, qui a porté un modèle de configuration de fissure similaire à celui observé pour cette typologie *in situ*. Notamment, la zone qui est la plus vulnérable est la clé de l'arc. De même les fissures observées en diagonale des coupoles, pourraient être produites par différentes raisons. Ces dernières ont un lien très étroit avec, les zones vulnérables dû à la discontinuité de la géométrie des coupoles. Par conséquent une telle procédure d'exécution d'une telle architecture vernaculaire pourrait causer des dommages en combinaison avec d'autres causes, ou aggraver son évolution. En général, les résultats obtenus ont permis de comprendre les causes de l'ensemble des dommages qui menacent cette construction traditionnelle, il s'agit de : son système structurel et constructif, ainsi que ses matériaux. Elles sont principalement liées à la méconnaissance du comportement de ces derniers, au mauvais traçage de la ligne de pression, au manque d'adhérence entre les différents blocs, et aux liaisons fragiles qui provoquent l'instabilité de l'ensemble dû à une mauvaise transmission de l'effort au soubassement. Donc, elles sont liées à la structure de la construction elle-même, en particulier la coupole.

Conclusion : Evaluation Et Synthèse Des Résultats Obtenus

Pour conclure, à partir de ce cas d'étude, on a élaboré un organigramme qui conceptualise le processus global mis en place (Figure 129). Il est conçu de cinq phases principales. La première, dite de constatations, consiste à réaliser d'un bilan détaillé sur les pathologies observées à partir desquelles sont proposées différentes hypothèses sur les causes possibles et leurs origines. Ensuite une phase d'investigation *in situ* qui est essentielle dans le but, d'une part, une production de connaissance sur une typologie architecturale particulière et de poursuivre l'enquête sur les causes des dommages, et d'autre part, une collecte des données architecturales et constructives et des échantillons des matériaux. Ces derniers sont nécessaires à l'élaboration des résultats sur le comportement de la maçonnerie à travers des essais aux laboratoires et le mode constructif de cette architecture unique dans cette zone. La phase d'évaluation structurelle permet de vérifier certaines causes des dommages et d'évaluer le degré de vulnérabilité de la structure en *Rose des Sables*. L'analyse combine l'ensemble des études (historiques, d'instrumentation, et d'évaluation de comportement structurel) pour conclure sur les origines des pathologies, de prophétiser leur évolution et de définir le niveau de sécurité des structures. Elle pourrait conduire finalement à la prise de décision quant à la proposition d'une solution de confortement et les mesures de conservation permanentes pour éviter la disparition totale de cette architecture vernaculaire exceptionnelle.

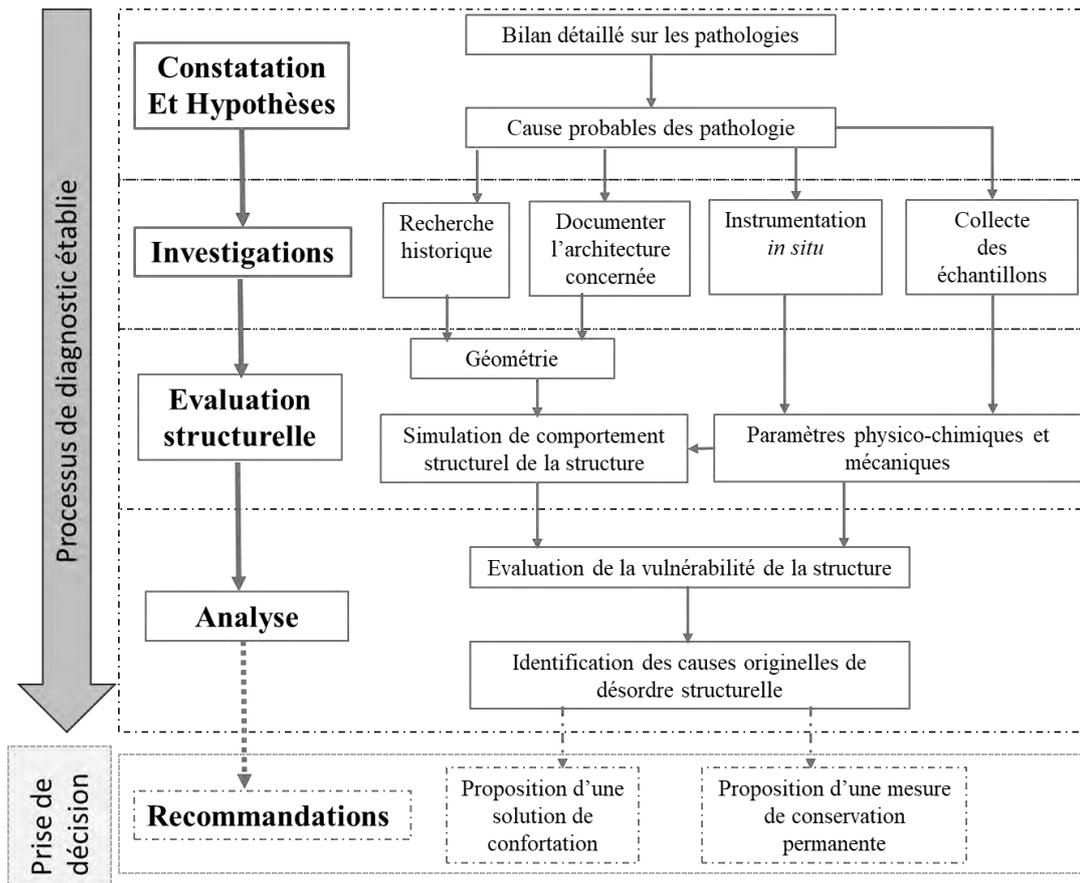


Figure 129. Organigramme conceptuelle du le processus global de diagnostic élaboré, et les perspectives proposées pour le travail (l'auteure).

2. Perspectives de la recherche

Le présent travail ouvre des perspectives de recherche variées, et qui permettent des approfondissements dans plusieurs aspects. En effet, De nombreuses perspectives sont envisagées afin de résoudre des problèmes selon différents aspects.

Concernant les problèmes liés à la perte des savoirs traditionnels, il serait intéressant d'approfondir les connaissances relatives à la culture traditionnelle des monuments, aux techniques de construction, et de mener une autre campagne d'entretiens approfondis avec les anciens maîtres constructeurs. Cela servira à contrer la perte des connaissances relatives à toute la culture traditionnelle constructive de la région du *Souf*. En outre, la collecte et la structuration des informations collectées représenteraient une base de données précieuse et importante à transmettre aux générations futures et à partir de laquelle on peut instaurer une méthode pour la conception de projets de restauration et de conservation, en plus de servir de base d'apprentissage aux écoles de formation

professionnelle. Ces connaissances pourront être principalement exploitables, en plus de la recherche présente, dans le cas où se trouve une volonté de la part du pouvoir public pour élaborer un dossier de classement universel du *Souf* et le faire passer de la liste indicative de l'Unesco à sa liste de patrimoine mondial.

Par ailleurs, il est recommandé de prospecter plus sur la maçonnerie en *Rose des Sables* vu la complexité et la variété de ces paramètres, à travers la réalisation des essais mécaniques sur un mur à l'échelle 1 :1 au laboratoire ou *in situ*, tel que le test semi-destructif double *flat-jack*... De plus, il serait important de faire une série de test mécanique sur plusieurs groupes d'échantillon de blocs de *Rose des Sables* pour étudier approfondir la connaissance sur l'effet de la porosité du matériau sur son comportement, et donc avoir un intervalle exact des paramètres mécaniques de celle-ci qui varié selon ce facteur, la porosité. Aussi, des essais mécaniques en laboratoires seront souhaitables pour définir les paramètres mécaniques du mortier de gypse et les comparer avec celles trouver par le pénétromètre.

Concernant l'étude du comportement structurelle de cette construction, il serait intéressant de faire des simulations structurelles numériques pour toute la maison à typologie cursive, qui constitue un agrégat. Cela pourrait permettre aussi d'évaluer l'effet d'avoir une maison mitoyenne sur le comportement structurel. Ainsi, il souhaitable d'évaluer le comportement structurel des monuments qui ont des typologies différentes des coupoles. De même, il est impératif d'étudier le comportement de la deuxième sous-catégorie des coupoles traditionnelles qui ont un profil plus haut et des pathologies moins observées que celles étudiés. Cela permettra de comparer les résultats des deux simulations et voir l'effet de la hauteur de profil de la coupole sur leurs comportements structurels (l'effet du tracé et de la transmission des efforts).

Enfin, il serait intéressant d'innover un projet pilote de consolidation d'une maison résidentielle adaptée selon le modèle d'analyse structurelle pour ressortir tous les points positifs, afin d'exploiter le côté bénéfique que présente cette pierre : sa ductilité. Cela se ferait par la proposition de plusieurs dispositifs de consolidations, tel qu'une proposition de rajouter des contreforts suivant plusieurs scénarios dont la position de ceux-ci qui se différencie, et à travers une série de simulation de comportement structurel des modèles proposés, une évaluation pourrait aider à définir la position la plus adéquate des contreforts. Concernant la maçonnerie, il serait indispensable de faire

Conclusion : Evaluation Et Synthèse Des Résultats Obtenus

une étude pour améliorer son comportement et surtout celui du gypse, en utilisant des matériaux composites. Cela pourrait être vérifié par une série de propositions concrètes et évaluées par des essais mécaniques en laboratoire.

La démarche de diagnostic structurel proposée avec l'étude multidisciplinaire du site et au laboratoire, a fourni, d'une part, une interprétation solide des dommages observés et une base sur laquelle pivote des stratégies de conservation spécifiques et, d'autre part, constitue une feuille de route précieuse pour des diagnostics et d'enquêtes pour des cas similaires dans le futur.

Bibliographies*

- Abderrahim Mahindad, N. (2017). *Les différents systèmes constructifs et l'évolution des caractéristiques des matériaux archéologiques du XIII ème au XVII ème siècle en Algérie*. Faculté des sciences de l'ingénieur, Université M'Hamed Bougara. Boumerdes
- Abruzzese, D., Miccoli, L., & Yuan, J. (2009). Mechanical behavior of leaning masonry Huzhu Pagoda. *Journal of Cultural Heritage*, 10(4), 480–486. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.02.004>
- Acary, V. (2001). *Contribution à la modélisation mécanique et numérique des édifices maçonnés*. Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II. Aix-en-Provence & Marseille.
- Alecci, V., Misseri, G., Rovero, L., Stipo, G., de Stefano, M., Feo, L., & Luciano, R. (2016). Experimental investigation on masonry arches strengthened with PBO-FRCM composite. *Composites Part B: Engineering*, 100, 228–239.
- Almeida, C., Guedes, J. P., Arêde, A., Costa, C. Q., & Costa, A. (2012). Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 30, 188–197. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.043>
- Alomari, A. (2014). *Evaluation des risques d'altération d'origine thermo-hydro-mécanique des pierres du patrimoine bâti*. Université d'Orléans. Orléans.
- Altunişik, A. C., Adanur, S., Genç, A. F., Günaydin, M., & Okur, F. Y. (2016). Non-destructive testing of an ancient Masonry Bastion. *Journal of Cultural Heritage*, 22, 1049–1054. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.05.008>
- Arias, P., Armesto, J., Di-Capua, D., González-Drigo, R., Lorenzo, H., & Pérez-Gracia, V. (2007). Digital photogrammetry, GPR and computational analysis of structural damages in a mediaeval bridge. *Engineering Failure Analysis*,

* Citations & bibliographie gérées et générées automatiquement avec **Mendely Reference Manger**, moteur de référencement édité par *Mendeley Ltd*. Le style de citation usité est « American Psychological Association 7th edition » répondant aux normes bibliographiques édictées par American Psychological Association APA. Disponible en ligne l'adresse : <https://www.mendeley.com/download-desktop-new/>, consulté le 10/11/2019.

- 14(8), 1444–1457. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.02.001>
- Arias, P., Herráez, J., Lorenzo, H., & Ordóñez, C. (2005). Control of structural problems in cultural heritage monuments using close-range photogrammetry and computer methods. *Computers & Structures*, 83(21–22), 1754–1766. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.02.018>
- ASTMD3967-16. (2016). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Auvray, C., Homand, F., Hoxha, D., & Didier, C. (2003). Influence du temps sur le comportement du gypse. In *Colloque International Après-mine*. Nancy.
- Azil, C., Djebri, B., Fratini, F., Misseri, G., & Rovero, L. (2020). Desert Rose Stone Constructions Covered with Domes in the Souf Region (Algeria). *International Journal of Architectural Heritage*, 1–20. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1813353>
- Azil, C., Djebri, B., & Rovero, L. (2018). Desert rose: building material of copulas in the Souf region in Algeria. In *Sustainable Buildings and cities*. Fez, Morocco: IOP Conference Series.: Material Science Engineering.
- Azil, C., Djebri, B., & Rovero, L. (2019). Diagnosis processes for Desert Rose domes of the Souf region in Algeria. In *2nd International Conference of Geomatics and Restoration*. Milan, Italy: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XLII-2/W11, 2019).
- Azil, C., Djebri, B., Rovero, L., Misseri, G., & Tonietti, U. (2019). Numerical Modeling of Desert Rose stone domes in the Algerian region of Souf. In *Reuso*. Matera, Italy: Reuso Patrimonio in Divenire, Conoscere, Valorizzare, Abitare.
- Azil, C., Rovero, L., Djebri, B., Fratini, F., Misseri, G., & Tonietti, U. (2020). The Desert Rose domes of the Souf region (algeria). Preliminary evaluations on the vulnerability of a unique vernacular heritage. In *HERITAGE2020 (3DPast | RISK-Terra) International Conference*. Valencia, Spain: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIV-M-1-2020, 2020.
- Backes, H. P. (1985). *On the behavior of masonry under tension in the direction of the bed joints*. Aachen University of Technology. Aachen.
- Bartoli, G., & Betti, M. (2013). *Cappella dei Principi in Firenze, Italy: Experimental Analyses and Numerical Modeling for the Investigation of a Local Failure*.

Références bibliographiques

- Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(1), 4–26. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000315)
- Bartoli, G., Betti, M., Blasi, C., Ottoni, F., Coli, M., Marchetti, E., & Ripepe, M. (2016). Synergistic and Interdisciplinary Approaches for the Conservation of Monumental Heritage: Cupola of Santa Maria del Fiore in Florence, Italy. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(4), 04015091. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000831](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000831)
- Bartoli, G., Betti, M., & Borri, C. (2015). Numerical Modeling of the Structural Behavior of Brunelleschi's Dome of Santa Maria del Fiore. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(4), 408–429. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.797038>
- Bataillon, C. (1955). *Le Souf. Étude de géographie humaine*. Institut de recherches sahariennes Alger. Université d'Alger.
- Battesti, V. (2006). De l'habitation aux pieds d'argile, Les vicissitudes des matériaux et techniques de construction à Siwa (Égypte). *Journal Des Africanistes*, 76(1), 65–185.
- Bazant, Z., & Cedolin, L. (1991). *Stability of structures: elastic, inelastic, fracture, and damage theories* (Oxford univ press). New York.
- Beck, K. (2006). *Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*. Université d'Orléans. Orléans.
- Bel, F., & Cuhe, D. (1970). *Etude des nappes du Complexe Terminal du bas Sahara. Données géologiques et hydrogéologiques pour la reconstruction du modèle mathématique*. Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Ouargla, Algérie.
- Belhadj, N. (2011). L'habitat traditionnel à Oued Souf. Retrieved December 10, 2016, from https://www.rehabimed.net/wp-content/uploads/2011/02/160_ARG_Nabila%20Belhadj.pdf
- Berto, L., Saetta, A., Scotta, R., & Vitaliani, R. (2002). An orthotropic damage model for masonry structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 55(2), 127–157. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/nme.495>
- Betti, M., Orlando, M., & Vignoli, A. (2011). Static behaviour of an Italian Medieval Castle: Damage assessment by numerical modelling. *Computers & Structures*, 89(21–22), 1956–1970. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.05.022>

- Bigio, A. G., & Guido, L. (2010). The urban rehabilitation of medinas: The World Bank experience in the Middle East and North Africa. *World Bank: Urban Development Series*.
- Binda, L., Saisi, A., & Zanzi, L. (2003). Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolò l'Arena (Italy). *NDT & E International*, 36(4), 215–227.
- Boostani, A., Fratini, F., Misseri, G., Rovero, L., & Tonietti, U. (2018). A masterpiece of early Islamic architecture: The Noh-Gonbad Mosque in Balkh, Afghanistan. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 248–256. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.001>
- Borri, A., Cangì, G., de Maria, A., & Donà, C. (2001). Metodi qualitativi per la valutazione della qualità muraria. In A. Baila, L. Galano, A. Vignoli, L. Binda, G. Cangì, G. Cardani, ... A. Vignoli (Eds.), *Manuale delle murature storiche* (Srl DEI).
- Borri, Antonio, & Bussi, L. (2011). *Archi e volte in zona sismica: meccanica delle strutture voltate* (Doppiavoce). Napoli.
- Borri, Antonio, Corradi, M., Castori, G., & de Maria, A. (2015). A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(9), 2647–2665.
- Bossuet, L. (2003). *Habiter le patrimoine au quotidien, selon quelles conceptions et pour quels usages*. Université européenne d'été Val de Loire. Val de Loire.
- Boulifa, K. (2012). *Synthèse hydrogéologique sur la région d'El-Oued Sahara nord oriental – Est Algérien*. Département des Sciences Géologiques, Université Constantine 1 Faculté des Sciences de la Terre, de la géographie et de l'Aménagement du Territoire. Constantine.
- Briccoli Bati, S., Ranocchiali, G., & Tonietti, U. (2001). Il problema della valutazione delle proprietà meccaniche attuali e della affidabilità statica residua di elementi portanti lapidei e/o in calcestruzzo armato. In *Proceedings of the national congress, Crolli e affidabilità delle strutture civili*. Venezia, Italia.
- Brumana, R., Condoleo, P., Grimoldi, A., Banfi, F., Landi, A. G., & Previtali, M. (2018). HR LOD based HBIM to detect influences on geometry and shape by stereotomic construction techniques of brick vaults. *Applied Geomatics*, 10(4), 529–543. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0209-3>

Références bibliographiques

- Caimi, A. (2014). *Vernacular building cultures and resilience: knowledge, practice and technique: apprehending vernacular as genius loci and disaster resilient ingenuity*. Université de Grenoble. Grenoble.
- Calia, A., Laurenzi Tabasso, M., Maria Mecchi, A., & Quarta, G. (2014). The study of stone for conservation purposes: Lecce stone (southern Italy). *Geological Society, London, Special Publications*, 391(1), 139–156. Retrieved from <https://doi.org/10.1144/SP391.8>
- Castellazzi, G., D'Altri, A., Bitelli, G., Selvaggi, I., & Lambertini, A. (2015). From Laser Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure. *Sensors*, 15(8), 18360–18380. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s150818360>
- Castellazzi, G., D'Altri, A. M., de Miranda, S., & Ubertini, F. (2017). An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. *Engineering Structures*, 132, 229–248. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.032>
- Cavalagli, N., & Gusella, V. (2015). Structural Investigation of 18th-Century Ogival Masonry Domes: From Carlo Fontana to Bernardo Vittone. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), 265–276. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.771294>
- Chennaoui, Y. (2011). Le procédé constructif : système technique et de mise en œuvre du mausolée royal de Maurétanie à Tipasa. Nature et filiations. *L'africa Romana*, XVIII, 215–231.
- CNERIB. (1993). *Voûtes et coupoles en matériaux locaux*. Ministère de l'habitat. Algérie.
- Como, M. (2015). *Statica delle costruzioni storiche in muratura: archi, volte, cupole, architetture monumentali, edifici sotto carichi verticali e sotto sisma* (Aracne 2. ed). Roma.
- Coste Anne. (1997). *L'architecture gothique. Lectures et interprétations d'un modèle* (PU Saint-E). Saint-Etienne.
- Coté, M. (2005). *La ville et le désert : le Bas-Sahara algérien* (Karthala É). Paris.
- Coté, M. (2006). *Si le Souf m'était conté: Comment se fait et se défait un paysage* (Média-Plus). Constantine.

- D'Ayala, D. F., & Tomasoni, E. (2008). The structural behaviour of masonry vaults: Limit state analysis with finite friction. . In *Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance*, 67–82. London: CRC Press.
- D'Ayala, D. F., & Tomasoni, E. (2011). Three-Dimensional Analysis of Masonry Vaults Using Limit State Analysis with Finite Friction. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(2), 140–171.
- de Kock, T., Dewanckele, J., Boone, M., de Schutter, G., Jacobs, P., & Cnudde, V. (2014). Replacement stones for Lede stone in Belgian historical monuments. *Geological Society, London, Special Publications*, 391(1), 31–46. Retrieved from <https://doi.org/10.1144/SP391.9>
- Décret exécutif n° 14-27 du Aouel Rabie Ethani 1435 correspondant au 1er février 2014 fixant les prescriptions urbanistiques, architecturales et techniques applicables aux constructions dans les wilayas du Sud. (2014). Journal officiel de la république algérienne n° 06.
- del Zoppo, M., di Ludovico, M., Balsamo, A., & Prota, A. (2019). In-plane shear capacity of tuff masonry walls with traditional and innovative Composite Reinforced Mortars (CRM). *Construction and Building Materials*, 210, 289–300.
- Delaval, B. (1974). Urban communities of the Algerian Sahara. *Ekistics*, 38, 252–258.
- Deng, Y., Ridley, A. J., & Wang, W. (2008). Effect of the altitudinal variation of the gravitational acceleration on the thermosphere simulation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A9). Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2008JA013081>
- di Benedetto, C., Cappelletti, P., Favaro, M., Graziano, S. F., Langella, A., Calcaterra, D., & Colella, A. (2015). Porosity as key factor in the durability of two historical building stones: Neapolitan Yellow Tuff and Vicenza Stone. *Engineering Geology*, 193, 310–319. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.006>
- DIANA FEA. (2009). *User's Manual. DIANA Finite Element Analysis*.
- Djilali, S. (2004). *Ferries et mutations des oasis du bas-Sahara algérien. Les Ziban, L'Oued Righ et Le Souf* (ANEP). Alger.
- Doleželová, M., Krejsová, J., & Vimmrová, A. (2018). Influence of fine aggregate on some properties of gypsum mortars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 379. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1757-899X/379/1/012005>

- Domede, N. (2010). *Caractérisation expérimentale de deux pierres naturelles de construction* (AUGC). La Bourboule.
- Domede, Nathalie, Sellier, A., & Stablon, T. (2013). Structural analysis of a multi-span railway masonry bridge combining in situ observations, laboratory tests and damage modelling. *Engineering Structures*, 56, 837–849. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.052>
- Dore, C., Murphy, M., McCarthy, S., Brechin, F., Casidy, C., & Dirix, E. (2015). Structural Simulations and Conservation Analysis -Historic Building Information Model (HBIM). *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W4. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-351-2015>
- Driouèche, N. (2012). *Les coupoles d'al-djaza'ir de l'époque ottomane (XVIe-XIXe siècles)*. Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme EPAU, Alger.
- Drougkas, A., Roca, P., & Molins, C. (2016). Material characterization and micro-modeling of a historic brick masonry pillar. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(7), 887–902.
- Duffaut, P. (2004). *Manuel de mécanique des roches* (Presses des MINES, Vol. 2). Paris.
- Durand-Claye, A. (1866). *Note sur la vérification de la stabilité des voûtes de maçonnerie et sur l'emploi des courbes de pression* (E. Thunot). Paris.
- Echallier, J. C. (1968). *Essai sur l'habitat sédentaire traditionnel au Sahara algérien*. Université Paris I. Paris.
- EUROCODICE 6. (2007). *Progettazione delle strutture di muratura*. Milano.
- F. Laefer, D., Truong-Hong, L., & Fitzgerald, M. (2011). Processing of Terrestrial Laser Scanning Point Cloud Data for Computational Modelling of Building Facades. *Recent Patents on Computer Science*, 4(1), 16–29. Retrieved from <https://doi.org/10.2174/2213275911104010016>
- FARO. (2013). FARO Focus3D user manuals. Retrieved April 4, 2019, from <http://www.faro.com/en-us/products/3d-surveying/faro-focus3d/overview>
- Ferry, C. (1951). *Le Souf. Documents Algériens, Série Monographie*. Alger.
- Fezzai, S., Ahriz, A., & Alkama, D. (2012). Evaluation des performances énergétiques de l'habitat traditionnel dans la région du Souf. In *XXXe Rencontres AUGC-IBPSA*. Chambéry.

- Fregonese, L., Barbieri, G., Biolzi, L., Bocciarelli, M., Frigeri, A., & Taffurelli, L. (2013). Surveying and Monitoring for Vulnerability Assessment of an Ancient Building. *Sensors*, 13(8), 9747–9773. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s130809747>
- Freytag, M., Shapiro, V., & Tsukanov, I. (2011). Finite element analysis in situ. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(9), 957–972. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.finel.2011.03.001>
- Furlan, V., & Bissegger, P. (1975). Les mortiers anciens: histoire et essais d'analyse scientifique. *Revue Suisse d'Art et Archéologie*, 32.
- Galassi, S., & Tempesta, G. (2019). The Matlab code of the method based on the Full Range Factor for assessing the safety of masonry arches. *MethodsX*, 6, 1521–1542. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.05.033>
- Grande, E., & Romano, A. (2013). Experimental investigation and numerical analysis of tuff-brick listed masonry panels. *Materials and Structures*, 46(1–2), 63–75.
- Gucci, N., & Barsotti, R. (1995). A non-destructive technique for the determination of mortar load capacity in situ. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(7), 276–283. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)92387-W](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)92387-W)
- Hafiane, I. (2015). *Patrimoine ksourien d'El Oued : entre défis et réalités cas du ksar "Laachaache-Messaba"*. Département d'Architecture, Université de Constantine. Constantine
- Heyman, J. (1969). The safety of masonry arches. *International Journal of Mechanical Sciences*, 11(4), 363–385. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(69\)90070-8](https://doi.org/10.1016/0020-7403(69)90070-8)
- Heyman, J. (1997). *The stone skeleton: structural engineering of masonry architecture* (Cambridge University Press). Cambridge.
- Hillerborg, A., Modéer, M., & Petersson, P.-E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6(6), 773–781. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90007-7)
- Hinks, T., Carr, H., Truong-Hong, L., & Laefer, D. F. (2013). Point Cloud Data Conversion into Solid Models via Point-Based Voxelization. *Journal of Surveying Engineering*, 139(2), 72–83. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000097](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000097)

- Houben, H., Hubert, G., Dayre, M., Bard, P.-Y., & Perrier, G. (2006). *Traité de construction en terre* (parenthèses). Mareseille.
- Igea Romera, J., Martínez-Ramírez, S., Lapuente, P., & Blanco-Varela, M. T. (2013). Assessment of the physico-mechanical behaviour of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time. *Environmental Earth Sciences*, 70(4), 1605–1618. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2245-y>
- Kahraman, S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 981–994. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00039-9)
- Karaman, K., & Kesimal, A. (2015). Evaluation of the influence of porosity on the engineering properties of volcanic rocks from the Eastern Black Sea Region: NE Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(1), 557–564. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1217-6>
- Kazhdan, M., & Hoppe, H. (2013). Screened poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, 32(3), 1–13. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2487228.2487237>
- Khechana, S. (2007). *Etude de la gestion intégrée des ressources en eaux dans la vallée de Oued-Souf.*, Département de Géologie de la Faculté des Sciences de la Terre, université Badji Mokhtar. Annaba.
- Khechana, S., Derradji, F., & Derouiche, A. (2010). La gestion intégrée des ressources en eau dans la vallée d'Oued-Souf (SE Algérien): Enjeux d'adaptation d'une nouvelle stratégie. *Revue Des Sciences Fondamentales et Appliquées*, 2(2), 22–36.
- Khezzani, B., & Bouchemal, S. (2018). Variations in groundwater levels and quality due to agricultural over-exploitation in an arid environment: the phreatic aquifer of the Souf oasis (Algerian Sahara). *Environmental Earth Sciences*, 77(4), 1–18.
- Korumaz, M., Betti, M., Conti, A., Tucci, G., Bartoli, G., Bonora, V., ... Fiorini, L. (2017). An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Engineering Structures*, 153, 224–238. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.026>
- la Spina, V. (2018). Study of traditional gypsum in Spain: Methodology and initial results. *Building Knowledge, Constructing Histories*, 2, 829–836.

- la Spina, V, F. Fratini, E. Cantisani, C. Mileto, & F.V López-Manzanares. (2014). The ancient gypsum mortars of the historical façades in the city center of Valencia (Spain). In *Periodico di Mineralogia*, 443–457.
- Lancaster, L. C. (2015). Complex vault forms of brick. In *Innovative Vaulting in the Architecture of the Roman Empire* (Cambridge University Press). Cambridge. Retrieved from <https://doi.org/10.1017/CBO9781107444935.005>
- Laurent, J.-M. (2007). *Construction et restauration des bâtiments en pierre* (Vial). Pont l'Abbé.
- Lebsir, A. (2016). *Les cultures constructives traditionnelles architecture : Cas des Aurès, L'Oued Mya et Le Souf*. Département d'Architecture, université Mohamed Khider. Biskra.
- López-Doncel, R. A., Wedekind, W., Dohrmann, R., & Siegesmund, S. (2013). Moisture expansion associated to secondary porosity: an example of the Loseros Tuff of Guanajuato, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1189–1201.
- Lourenço, P. B., Fernandes, F. M., & Castro, F. (2010). Handmade Clay Bricks: Chemical, Physical and Mechanical Properties. *International Journal of Architectural Heritage*, 4(1), 38–58. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15583050902871092>
- Mangin, D., & Panerai, P. (1978). Institutions et formes urbaines. Guémar et Tamelhat, Algérie. *Architecture Mouvement et Continuité*, 48, 63–73.
- Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G., & Prota, A. (2007). Experimental and numerical evaluation of tuff masonry panels shear seismic capacity. In *the 10th North American Masonry Conference*. St. Louis, Missouri.
- Matysek, P., & Witkowski, M. (2016). A comparative study on the compressive strength of bricks from different historical periods. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(4), 396–405.
- Mecca, S., Abou Sekeh, F., Algros, J.-J., Durá, A. A., Arakadaki, M., Awad, N., ... Vegas, F. (2009). *Earthen Domes and Habitats. Villages of Northern Syria. An architectural tradition shared by East and West*. (S. Mecca & L. Dipasquale, Eds.) (Edizioni ETS). Pisa.
- Mehibel, M., Pitts, A., & Gao, Y. (2014). Sustainability and the Urban Planning Context: Housing Development in Algeria. In *PLEA (Passive and Low Energy Architecture) Proceeding*. Ahmadabad.

Références bibliographiques

- MesLab. (2016). MeshLab tutorials. Retrieved January 3, 2020, from www.meshlab.net
- Middendorf, B., Hughes, J. J., Callebaut, K., Baronio, G., & Papayianni, I. (2005). Investigative methods for the characterisation of historic mortars – Part 1: Mineralogical characterisation. *Materials and Structures*, 38(8), 761–769. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/BF02479289>
- Ministère de l’Habitat et de l’Urbanisme. DTR BC 2-48, Règles Parasismiques Algériennes RPA 99, Pub. L. No. RPA 99, Version 2003 (2003). Algérie: Edition CGS.
- Moayedian, S. M., & Hejazi, M. (2021). Stress-strain relationships for scaled gypsum mortar and cement mortar brick masonry. *Journal of Building Engineering*, 33, 101861. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101861>
- Mohammed, A., Hughes, T. G., & Mustapha, A. (2011). The effect of scale on the structural behaviour of masonry under compression. *Construction and Building Materials*, 25(1), 303–307. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.025>
- Moh’d, B. K. (2009). Compressive strength of vuggy Oolitic limestones as a function of their porosity and sound propagation. *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2(1), 18–25.
- Montclos, J.-M. P. (2011). *Architecture : description et vocabulaire méthodiques* (Ed. Du Patrimoine Centre des monuments nationaux). Paris.
- Mukupu, W., Roberts, G. W., Hancock, C. M., & Al-Manasir, K. (2016). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review*, 99–116. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/00396265.2015.1133039>
- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27(4). Retrieved from <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>
- Najah, A. (1971). *Le Souf des Oasis (la maison)*. Alger.
- NF EN 772-1. (2011). *Méthodes d’essai des éléments de maçonnerie : Partie 1 : détermination de la résistance à la compression*.
- NF EN 1052-1. (1999). *Méthodes d’essai de la maçonnerie* (AFNOR).

Références bibliographiques

- NF EN 1926. (2007). *Méthodes d'essai des pierres naturelles, Détermination de la résistance en compression uniaxiale* (AFNOR).
- NF EN 1936. (2007). *Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouverte et totale* (AFNOR).
- Parent, T. (2015). *Diagnosis Methodology of historical Masonry Structures*. Université Toulouse 3. Toulouse.
- Perales, R. (2007). *Modelling by discrete elements of the mechanical behavior of the three-dimensional built works. Contribution to the definition of planar contact elements*. Montpellier.
- PEZZI. (2002). *Manuale di Installazione ed Uso. Penetrometro PNT-G*. Firenze.
- Plachy, T., Tesarek, P., Padevet, P., & Polak, M. (2009). Determination of Young's Modulus of Gypsum Blocks Using Two Different Experimental Methods. In C. Bulucea (Ed.), *Recent Advances in Applied and Theoretical Mechanics*. WSEAS Press.
- Recap Pro Autodesk. (2018). Recap Pro Manual user. Retrieved May 5, 2019, from <https://knowledge.autodesk.com/support/recap/learn>
- Reyes, E., Gálvez, J. C., Casati, M. J., Cendón, D. A., Sancho, J. M., & Planas, J. (2009). An embedded cohesive crack model for finite element analysis of brickwork masonry fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 76(12), 1930–1944. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.05.002>
- Rhinoceros 3D. (2019). User's Guide Rhino. Retrieved March 4, 2020, from <https://www.rhino3d.com/learn/>
- RhinoResurf. (2020). Documentation for RhinoResurf. Tutorials. Retrieved March 4, 2020, from <http://www.resurf3d.com/helpdoc/english/Tutorials.html>
- Rovero, L., & Fratini, F. (2013). The Medina of Chefchaouen (Morocco): A survey on morphological and mechanical features of the masonries. *Construction and Building Materials*, 47, 465–479. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.025>
- Rovero, L., & Tonietti, U. (2012). Structural behaviour of earthen corbelled domes in the Aleppo's region. *Materials and Structures*, 45(1-2), 171–184. Retrieved from <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9758-1>
- Rovero, L., & Tonietti, U. (2014). A modified corbelling theory for domes with horizontal layers. *Construction and Building Materials*, 50, 50–61. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.032>

- Rovero, Luisa, Alecci, V., Mechelli, J., Tonietti, U., & de Stefano, M. (2016). Masonry walls with irregular texture of L'Aquila (Italy) seismic area: validation of a method for the evaluation of masonry quality. *Materials and Structures*, 49, 2297-2314.
- Rovero, Luisa, Tonietti, U., Fratini, F., & Rescic, S. (2009). The salt architecture in Siwa oasis - Egypt (XII-XX centuries). *Construction and Building Materials*, 23(7), 2492-2503. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.003>
- Royer, J. (1932). *L'urbanisme aux colonies et dans les pays tropicaux* (Delayance). Nevers.
- Saibi, H., Semmar, A., Mesbah, M., & Ehara, S. (2009). Variographic analysis of water table data from the Oued-Souf phreatic aquifer, northeastern part of the Algerian Sahara. *Arabian Journal of Geosciences*, 2(1), 83-93.
- Santelli, S. (2011). Coupole de terre et habitats. *Archiscope*, 102, 27-29.
- Scelles-Millie, J. (1963). *Contes Sahariens du Souf* (Maisonneuv). Paris.
- Schuller, M. P. (2003). Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 5(4), 239-251. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/pse.160>
- Sébe, A. (1991). *Moula-Moula: Le Sahara à vol d'oiseau* (tagoulmous).
- Shiroma, L., Camarini, G., & Beraldo, A. L. (2016). Effect of wood particle treatment on the properties of gypsum plaster pastes and composites. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 21(4), 1032-1044. Retrieved from <https://doi.org/10.1590/s1517-707620160004.0095>
- Shu, C.-X., Cantisani, E., Fratini, F., Rasmussen, K. L., Rovero, L., Stipo, G., & Vettori, S. (2017). China's brick history and conservation: laboratory results of Shanghai samples from 19th to 20th century. *Construction and Building Materials*, 151, 789-800.
- Sidek, M. A. H., Yunus, R. M., Yahaya, F. M., Baderolhissam, M. F., & Khan, M. A.-N. K. A. (2017). Properties of Mortar with Red Gypsum as Cement Replacement Material by Using Industrial Approach Method. *Australian journal of basic and applied sciences*, 11(13), 115-121. Retrieved from <https://doi.org/10.22587/ajbas.2017.11.13.13>
- Tempesta, G., & Galassi, S. (2019). Safety evaluation of masonry arches. A numerical procedure based on the thrust line closest to the geometrical axis.

- International Journal of Mechanical Sciences*, 155, 206–221. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.02.036>
- Teza, G., & Pesci, A. (2013). Geometric characterization of a cylinder-shaped structure from laser scanner data: Development of an analysis tool and its use on a leaning bell tower. *Journal of Cultural Heritage*, 14(5), 411–423. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.10.015>
- Tucci, G., Rihal, S., Betti, M., Conti, A., Fiorini, L., Kovacevic, V. C., & Bartoli, G. (2019). Ground based 3D modelling (photogrammetry and TLS) - survey, documentation and structural assessment of XX century cultural heritage in India – a case study of the masonry vaults in Dehradun. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1105-2019>
- UNESCO. (2002). Tentative List, Oued Souf.
- UNI EN. (1926). *The European standard specifies a method for determining the uniaxial compressive strength of natural stones.*
- UNI EN 1015-11. (2007). *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita.*
- Vandal, J. (2020). Glossary of Medieval Art and Architecture. Retrieved January 20, 2020, from www.pitt.edu
- Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2009). Experimental characterization of stone masonry in shear and compression. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3337–3345. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.045>
- Vegas, F., Mileto, C., Ivorra, S., & Baeza, Fco. J. (2011). Checking Gypsum as Structural Material. *Applied Mechanics and Materials*, 117–119, 1576–1579. Retrieved from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1576>
- Vicario, M. (2017). *Conservazione e sostenibilità degli edifici storici. Il caso di Pamazzo San Clemente a Firenze* (DIDA Press). Florence
- Zanaz, A. (2016). *Probabilistic approach for masonry vault diagnosis*. Université de Limoges. Limoges.
- Zeza, U. (1976). *Petrografia microscopica* (La goliardica pavese). Italia.

Références bibliographiques

- Zouaouid, K., & Gheriani, R. (2019). Mineralogical Analysis of Sand Roses and Sand Dunes Samples from Two Regions of South Algeria. *Silicon*, 11(3), 1537-1545. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9974-1>
- Zulkefli, Z. F., Zawawi, M. H., Hassan, N. H., Zainol, M. R. R. M. A., Abas, M. A., & Mazlan, A. Z. A. (2018). Calculating the Moduli Elasticity For Reinforced Concrete Using New Rule of Mixtures Approach for the Dam Structure. *MATEC Web of Conferences*, 217. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821704003>

ANNEXES

1. Annexe A : Glossaire et abréviations.

FEM : Méthode des Eléments Finis.

Haouche : l'appellation local de la maison traditionnelle dans la région du Souf.

HBIM : _Historic building information modeling_ La modélisation des informations sur les bâtiments historiques (HBIM) est proposée comme nouveau système de modélisation des structures historiques ; le processus HBIM commence par la collecte à distance de données d'enquête à l'aide d'un scanner laser terrestre combiné à des appareils photo numériques. Une gamme de logiciels est ensuite utilisée pour combiner l'image et les données de numérisation (Murphy et al., 2009).

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Ksar (pluriel :*Ksour*), signifie étymologiquement palais. Les *Ksour* sont ces ensembles fortifiés qui s'étendent du Sud marocain au Sud tunisien et qui, à l'origine, étaient construits dans un souci défensif. De nos jours et avec la disparition des préoccupations défensives, le ksar désigne toute agglomération saharienne anciennement construite et de tendance plutôt rurale par opposition aux structures plus importantes que sont les *médinas*(Coté, 2005).

Largoub : l'appellation local du contrefort dans la région du Souf .

Liste indicative de l'UNESCO : Une liste indicative est un inventaire des biens que chaque État partie a l'intention de proposer pour inscription. Les États parties doivent donc inclure dans leur liste indicative des biens qu'ils considèrent comme étant un patrimoine culturel et/ou naturel de valeur universelle exceptionnelle susceptible d'inscription sur la Liste du patrimoine mondial.

Louz : l'appellation local de la pierre de la *Rose des Sables* dans la région du Souf.

NURBS : _Non-uniform rational basis spline_ Les splines de base rationnelle non uniformes sont des représentations mathématiques de la géométrie 3D qui peuvent décrire

avec précision n'importe quelle forme depuis une simple ligne 2D, un cercle, un arc ou une courbe jusqu'à la surface ou le solide de forme libre organique 3D le plus complexe. En raison de leur flexibilité et de leur précision, les modèles NURBS peuvent être utilisés dans n'importe quel processus, de l'illustration et de l'animation à la fabrication (Rhino.com).

Pétrographie : Science ayant pour objet l'étude de la composition chimique et minéralogique des roches et des minéraux, et celle de leur formation (cntrl.fr)

Sebkha : En Afrique du Nord, dépression inondable et salée. Élément essentiel du paysage semi-désertique, la sebkha est tour à tour une nappe d'eau sans profondeur et une étendue blanchâtre de sel aux rivages indécis et changeants, selon la saison et la pluviosité (larousse.fr).

Chott : Lac salé temporaire dans un désert, surtout en Afrique du Nord.

Springer : Le voussoir le plus bas de chaque côté d'un arc. C'est là que le support vertical de l'arc se termine et que la courbe de l'arc commence (Galassi & Tempesta, 2019; Vandal, 2020)

Tafza : pierre locale dans la région du *Souf*.

Thermographie : la technique permettant d'obtenir l'image thermique d'un objet étudié grâce à l'infrarouge. On obtient par cette analyse un thermogramme (AFNOR).

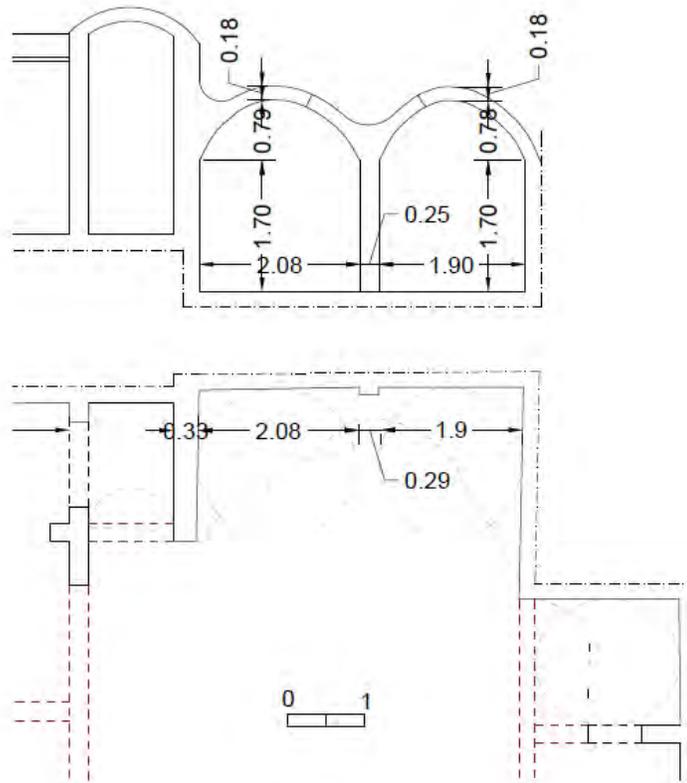
Voûte en arc de cloître : est une voûte obtenue par l'intersection de deux berceaux qui se croisent à angle droit e conservant les parties intérieures aux arêtes d'intersections (Vandal, 2020)

XRD _ X-Ray Diffraction_ : La diffraction des rayons X (est une technique non destructive qui fournit des informations détaillées sur la structure cristallographique, la composition chimique et les propriétés physiques des matériaux (Laser Surface Modification of Biomaterials, 2016)

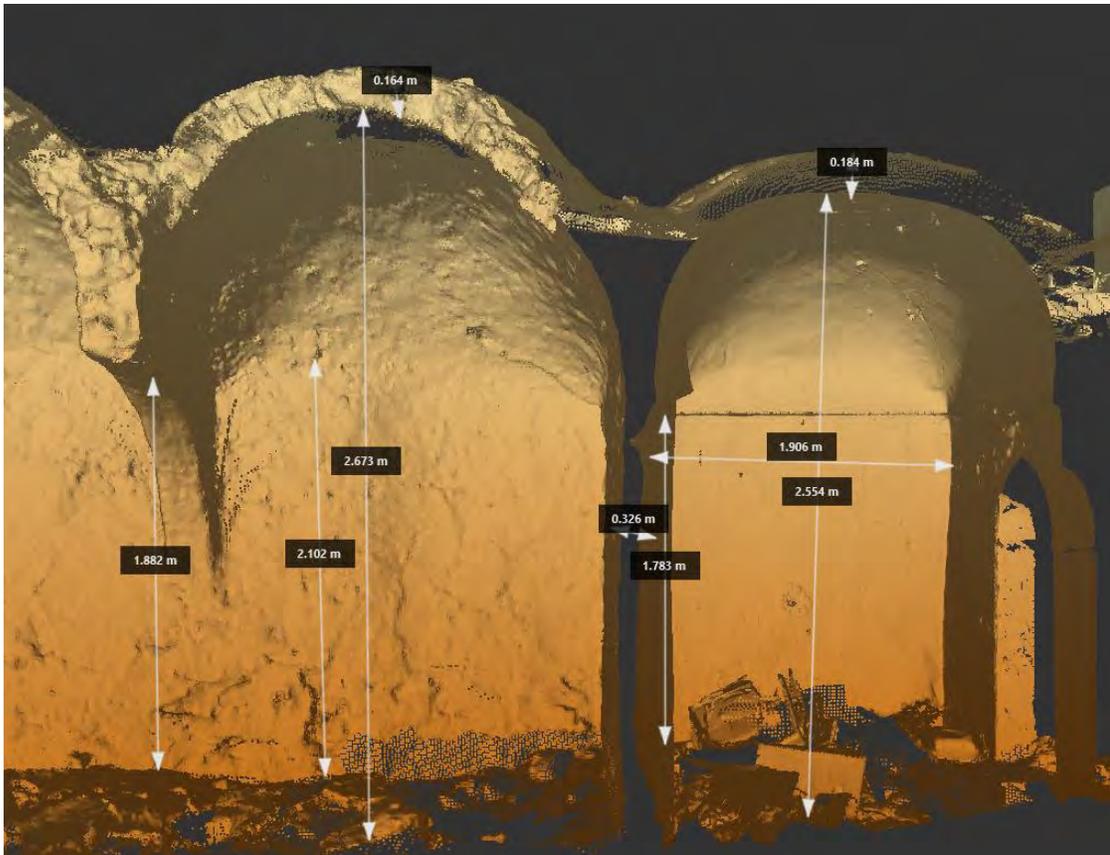
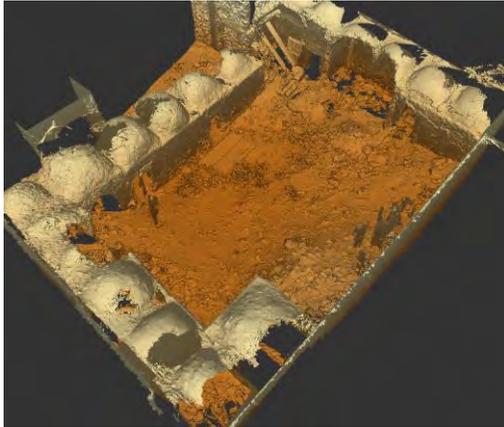
Bissectrice : est une droite ou une demi-droite qui partage un angle en deux angles égaux. Une bissectrice peut être considérée comme l'axe de symétrie d'un angle (alloprof.qc.ca).

2. Annexe B : Extrait de la documentation graphique

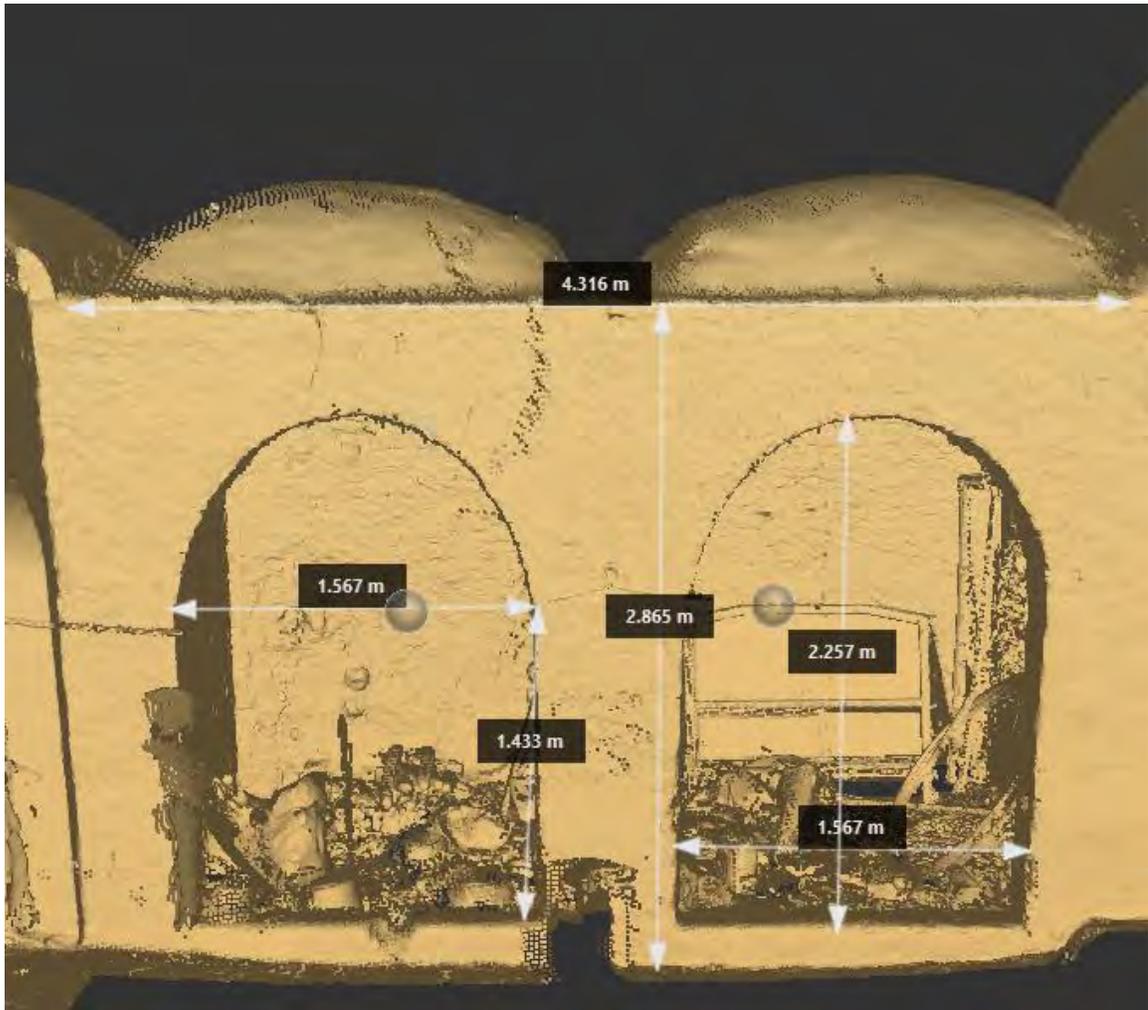
Exemple 1



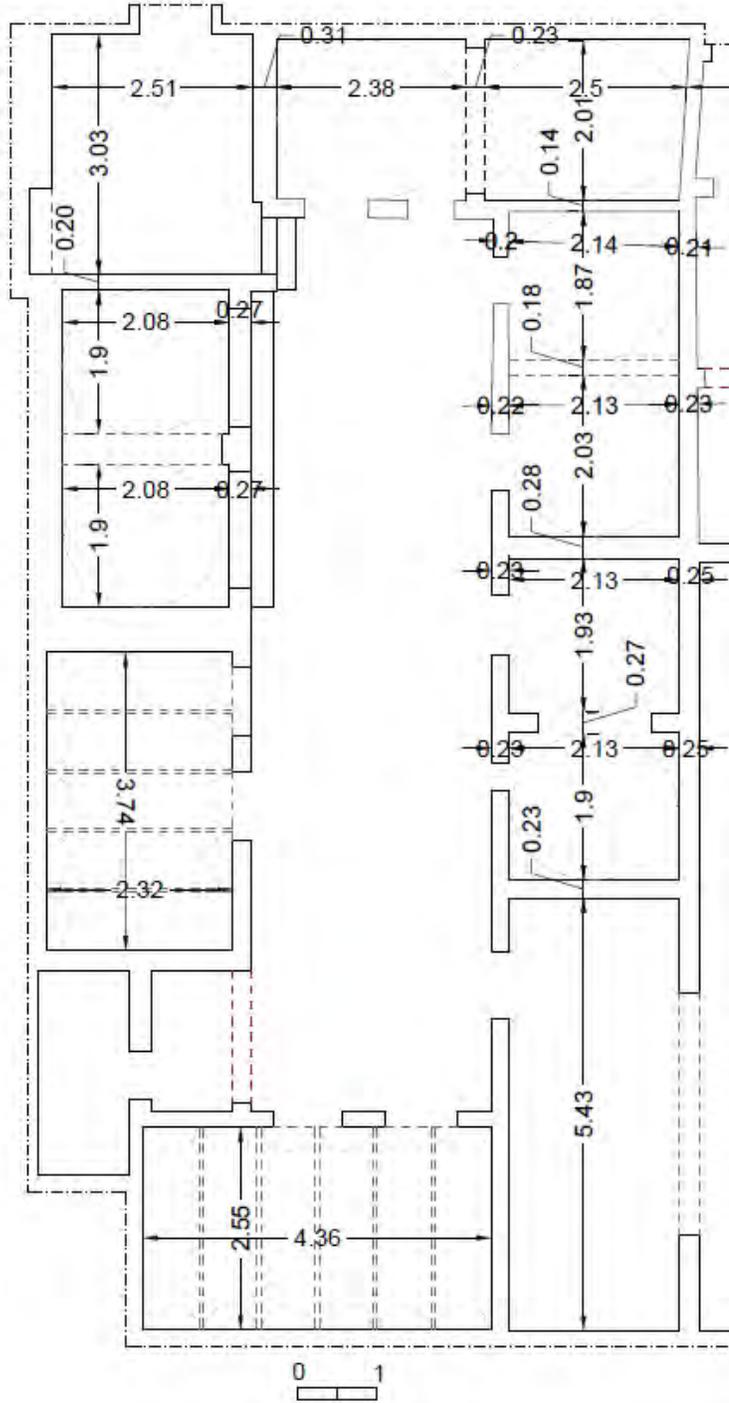
Exemple 2



Exemple 3



Exemple 4



3. Annexe C : Exemple de calcul des paramètres mécaniques

Fichier de calcul des paramètres mécaniques à partir de l'essai de compression uniaxiale du spécimen S1- DR1

Sachant que :

M : Résistance à la compression maximale

EE : Module d'élasticité = $(Y_{eL} - Y_{bL}) / (X_{eL} - X_{bL})$

μ_c : Ductilité cinématique = X_M / X_{Lp}

μ_{ca} : Ductilité cinématique disponible = X_U / X_M

In[1] = L = 52.3

Out[1] = 52.3

```

In[2] = Import["C:\\Users\\Dell\\Desktop\\C.dat"];
Loc11 = Table[%[[i]], {i, 1, Length[%], 10}];
Loc11SS = Table[{Loc11[[i]][[1]]/L, Loc11[[i]][[2]]/L^2}, {i, Length[Loc11]};
(**)
Sort[%, #1[[2]] < #2[[2]] &];
m = {%[[1]]}
0.8 * m[[1]][[2]]

```

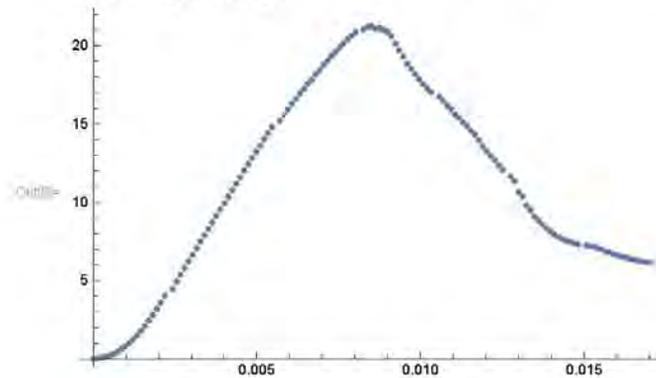
Out[2] = {0.00849904, 21.2336}

Out[7] = 16.9869

```

In[3] = Loc11SS = Table[{Loc11[[i]][[1]]/L, Loc11[[i]][[2]]/L^2}, {i, Length[Loc11]};
ListPlot[Loc11SS]

```



```

In[4] = ii = {{0.0024802697464910107, 4.505378781319429}};
l = {{0.005459688942743862, 14.758207210493172}};
u = {{0.010257714661384823, 16.937942388349008}};

```

```

In[7] = EE =  $\frac{l[[1]][[2]] - ii[[1]][[2]]}{l[[1]][[1]] - ii[[1]][[1]]}$ 
lp = {{ $\left\{ \frac{m[[1]][[2]] - ii[[1]][[2]]}{l[[1]][[1]] - ii[[1]][[1]]} + \frac{ii[[1]][[1]]}{l[[1]][[1]] - ii[[1]][[1]]} \right\}$ ,
       $\{l[[1]][[1]] - ii[[1]][[1]], m[[1]][[2]]\}$ }};
μc = m[[1]][[1]] / lp[[1]][[1]]
μca = u[[1]][[1]] / m[[1]][[1]]

```

