



# Les outils numériques dans l'étude de la pierre

---

Perrin Lélia

Mémoire de Master 2020-2021

ENSA Marseille

Séminaire : Patrimoine et Humanité Numérique

FASSE-CALVET Isabelle et GROS Antoine





# Les outils numériques dans l'étude de la pierre

---

L'importance des traces présentent dans la matière pour apporter des connaissances sur celle-ci, son histoire, sa conception, le travail autour de cette matière et son évolution.

Perrin Lélia

Mémoire de Master 2020-2021  
ENSA Marseille  
Séminaire : Patrimoine et Humanité Numérique  
FASSE-CALVET Isabelle et GROS Antoine



Je souhaiterais remercier les personnes qui m'ont soutenue et aidée dans mes recherches, ainsi que dans l'écriture de ce mémoire.

Tout d'abord, Mme Isabelle Fasse-Calvet et Mr Antoine Gros pour leur aide et le partage de leurs connaissances, tout au long de cette recherche, qui m'ont permis de faire évoluer mes réflexions.

Egalement, je souhaite remercier l'équipe du MAP-GAMSAU pour leur disponibilité, ainsi que le partage de leurs savoirs.

Pour finir, je remercie tout particulièrement ma famille et mes amis qui m'ont soutenu quotidiennement lors de mes recherches, ainsi que leurs nombreuses relectures de ce mémoire.





|                                                                                                                    |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Résumé                                                                                                             | 8       |
| Avant-Propos                                                                                                       | 10      |
| Introduction                                                                                                       | 12      |
| <br><b>I. La vie de la pierre : de la matière au matériau</b>                                                      | <br>16  |
| a. Approche rapide de la géologie                                                                                  | 18      |
| b. Les outils et les métiers qui interviennent dans le travail de la pierre                                        | 22      |
| 1. L'extraction depuis le Paléolithique                                                                            |         |
| 2. De l'ébauche à la finition                                                                                      |         |
| c. Les altérations de la pierre et les facteurs qui les influencent                                                | 46      |
| <br><b>II. La datation, l'une des études et recherches les plus importantes dans la connaissance du patrimoine</b> | <br>56  |
| a. Les écrits : première source de savoir et d'encrage de l'histoire du bâtiment                                   | 62      |
| b. Le style architectural : une approche non invasive                                                              | 64      |
| c. La dendrochronologie : une approche invasive                                                                    | 72      |
| d. Les traces d'outils : une approche invasive et non invasive                                                     | 76      |
| <br><b>III. Importance et impact du partage d'information dans la création d'une connaissance</b>                  | <br>92  |
| <br>Conclusion                                                                                                     | <br>102 |
| <br>Glossaire                                                                                                      | <br>104 |
| Bibliographie                                                                                                      | 108     |
| Annexes                                                                                                            | 112     |



Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du séminaire « Patrimoine et Humanité numérique ». La recherche qui est faite ici, traite de la pierre, mais surtout des savoirs autour de ce matériau.

L'approche de la pierre est, en premier lieu, faite par les traces d'outils et l'histoire qu'ils ont permis de véhiculer à travers le temps. L'intérêt était de proposer un protocole pour retrouver ces traces dans un édifice. Lors de l'avancée de ces réflexions autour de la pierre, la datation est apparue comme un moyen d'accéder à des informations importantes, notamment dans la mise en œuvre des matériaux dans les édifices.

La pluridisciplinarité impliquée dans l'étude d'un bâtiment patrimonial est apparue nécessaire, et à mettre au centre des réflexions pour permettre les échanges d'informations. Mais surtout de créer une connaissance et de définir les actions à mener sur le patrimoine.

### **Mots-clefs**

Pierre, Outils, Savoir-faire, Patrimoine, Numérique, Datation, Protocole, Relevé



Ce mémoire a été élaboré en différents temps. Tout d'abord, il fait suite à un changement de séminaire dans lequel je réfléchissais à l'imaginaire de l'architecte, en comparant le travail de certains architectes avec les écrits théoriques de Gottfried Semper.

Puis lors d'un changement de séminaire, en S8, il m'est apparu que l'imaginaire de l'architecte, en dehors des théories qui ont pu former sa pratique, se faisait avec la matière.

Cette réflexion a abouti, en premier lieu, à l'écriture conjointe d'un mémoire avec Chloé Leyder *Matière à penser : la pierre*. Cette recherche m'a permis de me familiariser avec l'outil numérique qui jusqu'alors n'était pas du tout présent dans ma pratique de l'architecture. Ce mémoire traitait donc de la pierre, en conservant nos questionnements personnels qui se rejoignaient en de nombreux points et surtout qui se complétaient. Ce qui m'intéressait dans la recherche autour de la pierre, c'était de comprendre les savoir-faire de l'extraction de la matière à sa mise en œuvre.

Lors de ce second semestre au sein du séminaire « Patrimoine et Humanité numérique », je me suis rendue compte que les outils numériques permettaient de percevoir les traces d'outils présents sur les bâtiments. Ce qui a donné lieu à la première phase de ma recherche qui a abouti à la proposition d'un protocole destiné à déceler ces traces d'outils, mais aussi à d'avoir une approche de la datation d'un édifice patrimonial et des disciplines que ces études impliquent.

« De la grotte de l'Homme des Eyzies aux tristement célèbres tours du World Trade Center de New York en passant par les pyramides d'Égypte, le Pont du Gard, les cathédrales nombreuses et diverses, les châteaux du Val de Loire, le Paris haussmannien, l'appartement de Monsieur Tout-le-monde, l'homme a toujours cherché à construire et marquer ainsi durablement son passage en assemblant des matériaux. Ces constructions, qu'elles soient destinées à l'architecture culturelle, militaire, administrative, agricole ou sportive, ont toujours bénéficié des matériaux et des savoir-faire locaux, dans une démarche vernaculaire. »<sup>1</sup>

Tels sont les mots de Michel Guisembert dans la préface de *L'Encyclopédie des Métiers, La maçonnerie et la taille de pierre*. Ce qu'il exprime ici correspond bien à ce qui a ancré le début de notre recherche dans ce mémoire : la création par l'homme de construction au départ pour se protéger et qui marque le territoire et façonne aujourd'hui les espaces dans lesquels nous vivons.

Ces constructions de la plus rudimentaire à la plus élaborée forment ce que nous appelons le patrimoine, et portent en elles la connaissance, le savoir-faire de l'époque à laquelle elles ont été édifiées.

La notion de patrimoine peut, selon la personne, qui l'utilise avoir plusieurs sens, il faut donc se mettre d'accord sur ce que signifie le patrimoine. Le patrimoine vient du latin *patrimonium*, qui signifie "héritage du père", et désigne les biens hérités de la famille. Le dictionnaire du CNRTL définit le patrimoine comme l'«ensemble des biens hérités des ascendants ou réunis et conservés pour être transmis aux descendants. »<sup>2</sup>. Dans cette définition les ruines, les bâtiments issus de civilisations disparues ne semblent pas être pris en compte et pourtant ils forment également un héritage commun à un groupe qu'il ne faut pas oublier.

Ce patrimoine culturel ne s'arrête pas à ce qui est matériel, il englobe aussi des éléments immatériels. Le patrimoine matériel désigne principalement le paysage construit, l'architecture, l'urbanisme, les aménagements agricoles et forestiers... Alors que le patrimoine immatériel lui désigne les us et coutumes des sociétés, les mythes, les légendes, les chants, la gastronomie, mais aussi les techniques et savoir-faire...

---

<sup>1</sup> : Préface de Michel Guisembert, *Normand la Clef des Cœurs*, Premier Conseiller de l'AOCDTF, dans *L'Encyclopédie des Métiers, La maçonnerie et la taille de pierre*. Tome 1, feuillet 1, page 7. 10 Tomes, éditeur : Compagnonnage, 1998

<sup>2</sup> : Définition du CNRTL. Disponible sur : <https://www.cnrtl.fr/definition/patrimoine>

La transmission de ce patrimoine donne lieu à des regroupements de chercheurs, d'historiens... qui se questionnent sur le sujet et les actions à mener dessus.

« Notre but est de transmettre le patrimoine culturel matériel aux générations futures, tout en assurant son usage actuel et en respectant sa signification sociale et spirituelle; toute mesure prise et toute action menée découlent d'un processus décisionnel interdisciplinaire et inclusif ; ce processus décisionnel comprend la documentation et la recherche (historique, d'histoire de l'art, scientifique ou technique) et tient compte des contextes passé, présent et futur du bien culturel. »<sup>3</sup>

Le patrimoine est aujourd'hui au centre de nombreuses questions et colloques sur sa conservation, sa restauration et sa transformation. Pour pouvoir prendre une position, il est important d'avoir des connaissances précises sur le bâtiment, aussi bien son état présent, que son état passé, avec les transformations qu'il a pu accueillir, son histoire, son usage,...

La question des connaissances autour du patrimoine ne date pas d'aujourd'hui, de nombreuses campagnes de représentation du bâti ont vu le jour avec la pratique du relevé qui connaît des moments forts dans son usage. Ces relevés représentent le bâtiment d'une manière rigoureuse et la plus exacte possible à un moment précis. La recherche de l'exactitude amène au progrès technique de représentation et de relevé. Ces premiers relevés manuels évoluent grâce aux outils numériques, qui ont permis de mettre en avant de nouveaux éléments concernant les savoir-faire ancestraux, mais aussi de mieux comprendre les pathologies du bâtiment.

Cette recherche de représentation exacte s'accompagne de l'évolution des méthodes d'analyses et de la compréhension des relevés. Le relevé n'est plus seulement fait pour une représentation de l'édifice, mais il permet de percevoir des éléments indiquant les étapes de constructions, les matériaux utilisés, les conditions de conservations, les désordres, les altérations ... Ces évolutions techniques ont un impact fort sur notre connaissance du patrimoine, mais aussi sur notre manière d'interagir avec lui et de l'étudier.

---

<sup>3</sup> : Terminologie de la conservation-restauration du patrimoine culturel matériel, Résolution adoptée par les membres de l'ICOM-CC à l'occasion de la XV Conférence triennale, New Delhi, 22-26 septembre 2008.

« Son objectif sera de comprendre les étapes par lesquelles l'édifice est passé pour rendre intelligible son état actuel, éclairer et préparer l'intervention concrète »<sup>4</sup>

Les études archéologiques permettent de mettre à jour les manières de vivre ancestrales, les us et coutumes, mais aussi leurs savoir-faire, qui ont pu être oublié ou mis de côté au profit des nouveaux outils. Ces savoir-faire et les questionnements autour de la construction ancienne amènent à l'ouverture de chantier, dit d'archéologie expérimentale, où les travailleurs utilisent pour reconstruire que ce qui était connu et possible d'utiliser à la période de construction originale et ainsi de reconstruire à l'identique sans toutes les machines, outils et techniques actuelles pour comprendre les manières de construire, les modes de fabrication et la réponse à l'abandon de certaines techniques. Ces expérimentations se basent sur les traces existantes, pour reproduire au mieux les objets utilisés, les techniques mises en place et créer une connaissance nouvelle qui dépasse la simple recherche et déduction.

La connaissance des us et coutumes ancestrales peuvent nous sembler sûre, mais sont sans cesse remises en question lors de nouvelles fouilles, de nouvelles expérimentations et de nouvelles découvertes. Céline Blondeau est archéologue et lors de son étude d'une carrière de pierre, à ciel ouvert du premier Moyen Âge, à l'éperon barré du Camp de César de Nucourt<sup>5</sup>, elle met en avant dans l'étude des traces d'outils, très présents dans cette carrière, de nouveau modes d'extractions et l'utilisation d'un outil, le marteau taillant, que les archéologues et historiens ne pensaient pas être utilisés à cette époque pour cette tâche.

Ces savoir-faire ancestraux sont remis en avant dans la pratique et les travaux des architectes pour répondre à l'épuisement des ressources et aux changements climatiques. Ces traces d'outils, les marquages sur la pierre, les récits (...) sont des éléments qui révèlent et mettent en avant un savoir-faire qu'il est important de connaître et de conserver.

---

<sup>4</sup>: Benjamin Mouton, dans l'Appel à communications, *Le relevé en architecture ou l'éternelle quête du vrai*, 2011, édition Lieux dits, Colloque de la Cité de l'architecture et du patrimoine.

<sup>5</sup>: Céline Blondeau, *Une approche nouvelle des modes d'extraction et des traces d'outil*, Archéologie médiévale [En ligne], 40 | 2010, mis en ligne le 07 septembre 2018. URL : <http://journals.openedition.org/archeomed/13428>



L'importance et l'impact de l'outil numérique sur la connaissance du patrimoine est aujourd'hui frappante. Cette connaissance acquise par les relevés, les documents anciens... permet de prendre des décisions lors de la restauration et de la conservation d'un édifice. Les informations sur les matériaux vont amener des protocoles de restauration particuliers. Les outils numériques peuvent, également, permettre la sensibilisation et le partage des connaissances au plus grand nombre.

La question qui se pose est : comment les outils numériques apportent-ils des connaissances spécifiques et nouvelles sur l'objet patrimonial ? De cette question, d'autres en découlent comme la différence entre chaque relevé, est-ce qu'ils interviennent dans le domaine du visible ou de l'invisible, est-ce que ces nouvelles instrumentations et techniques d'analyses permettent-elles de révéler ou de faciliter le repérage ?

La connaissance des méthodes de construction et des différentes figures d'altérations de la pierre amène, en lien avec ces nouveaux outils, des questionnements récents. Comment l'instrumentation et les différents relevés peuvent nous permettre de différencier et d'enregistrer les traces d'outils et les traces d'usures ?

Pour répondre à ces questionnements, nous verrons tout d'abord la pierre comme matière, de son extraction à sa finition, en évoquant les savoirs, les outils et les métiers qui la travaillent.

Ensuite nous verrons notamment à travers l'étude de l'Eglise de la Madeleine à Aix-en-Provence, comment il est possible de dater un bâtiment grâce à différentes analyses, mais aussi comment les outils numériques et les nouvelles technologies tels que la lasergrammétrie, la photogrammétrie, la RTI, l'imagerie scientifique (...) permettent de déceler de nouveaux éléments, quant à la vie du bâtiment de sa construction en passant par ses évolutions.

De cette approche de la datation, un nouvel élément apparaîtra : celui de la pluridisciplinarité de l'analyse d'un édifice. Nous verrons quels sont les enjeux de la mutualisation des données dans la connaissance du patrimoine. La mutualisation est aujourd'hui quelque chose de difficile. Cette difficulté du partage d'information est due à plusieurs facteurs. L'étude du patrimoine est complexe comme nous le verrons avec la datation. Elle fait intervenir différents acteurs experts dans des domaines variés dont il va falloir recouper les données.



# **I. La vie de la pierre : de la matière au matériau**

---



## **a. Approche rapide de la géologie**

Dans ce travail autour de la pierre, il est important de comprendre d'où vient ce matériau. La matière désigne une substance qui crée les corps que nous percevons par nos sens et dont les caractéristiques sont l'étendue et la masse. Elle désigne les corps dans leur état naturel, qui ne sont pas transformés. Le matériau lui désigne la matière transformée servant à la construction. La pierre est le matériau issu de la roche.

La roche est créée par les formations géologiques qui sont étudiées en géologie. La géologie est la «Science qui a pour objet de décrire et d'expliquer la nature, l'origine et la situation des roches, des terrains, etc., constituant la croûte terrestre»<sup>6</sup>. Plus précisément, « La géologie (du grec ancien gê, la Terre, et logos, le discours) est la science, dont le principal objet d'étude est la Terre, et plus particulièrement la lithosphère. Discipline majeure des sciences de la Terre, elle se base, en premier lieu, sur l'observation, puis établit des hypothèses permettant d'expliquer l'agencement des roches et des structures les affectant afin d'en reconstituer l'histoire et les processus en jeu. Le terme « géologie » désigne, également, l'ensemble des caractéristiques géologiques d'une région, et s'étend à l'étude des astres. Cette science moderne apparaît à partir du XVII<sup>e</sup> siècle, du désir de comprendre la structure de la Terre et d'un certain nombre de mécanismes à l'origine de phénomènes naturels.»<sup>7</sup> L'étude des roches est faite par les géologues, qui doivent faire appel à de nombreuses spécialités scientifiques comme la biologie, la physique, le chimie,...

---

<sup>6</sup>: Définition du CNRTL. Disponible sur : <https://www.cnrtl.fr/definition/géologie>

<sup>7</sup>: Définition de Wikipédia. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Géologie>



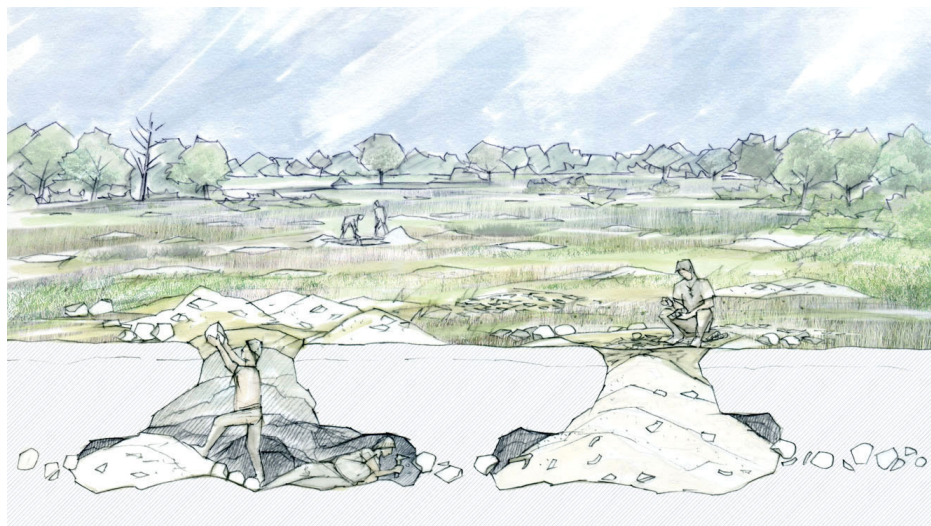


On trouve des dizaines de roches naturelles courantes comme le calcaire, le granite, le basalte, le grès, le marbre, le schiste, le marne,...

La roche est une matière constituante de l'écorce terrestre. Elles sont habituellement sous forme solide, cependant elles peuvent devenir liquides, comme la lave des volcans ou le pétrole. Elles peuvent aussi être sous forme gazeuse, ou dans un état meuble comme le sable qui est constitué de grains indépendants les uns des autres. La roche est constituée selon son origine de matière minérale, d'éléments détritiques préexistants et de vide, de taille variée, qui crée ce que l'on appelle la porosité.

Les géologues classent les roches sous 3 grands types : les roches métamorphiques, les roches sédimentaires et les roches magmatiques. La France est un patchwork géologique dû à la multitude d'évènements tectoniques et sédimentaire, avec des épisodes d'érosion qui l'ont façonnée. Elle contient en son sous-sol une grande variété de roches. Cette variété provient de soulèvements montagneux (anciens et actuels), d'éruption volcanique, d'érosion, de sédimentations.

La connaissance des roches permet au carrier d'adapter les outils avec lesquels il travaille, et d'extraire les pierres avec des techniques adaptées à chaque type et caractéristique de roches. La pierre prend son nom quand elle est extraite par l'Homme.



Dessin de Laurent Juhel et photographie d'Hervé Paitier

Vue d'un puits d'extraction de silex dans la commune de RI dans l'Orne, reconnue minière dans les années 1990. Dans les années 2007 suite a des fouilles de l'autoroute A88, l'INRAP a pu découvrir environs 650 puits et galeries sur une trentaine d'hectares. Ces fouilles ont permis de mettre a jour un réseau souterrain de galeries permettant l'extraction des blocs de silex. Le silex pouvait ensuite être taillé à proximité pour produire les haches.



## **b. Les outils et les métiers qui interviennent dans le travail de la pierre**

Depuis les débuts de l'extraction de la pierre, de nombreuses carrières ont été en activité. Il est avant tout important dans notre recherche de la trace de l'outils de connaître les méthodes d'extraction mais aussi de savoir les outils qu'utilisaient et qu'utilisent aujourd'hui les métiers qui travaillent la pierre.

### **1. L'extraction depuis le Paléolithique**

L'utilisation de la roche comme matériau de construction ou comme outil est apparu dès la préhistoire, il est intéressant de comprendre l'évolution des savoirs et de l'utilisation faite à partir de cette ressource.

« Comme l'indique la présence de l'adjectif lithique (du grec lithos, qui signifie « pierre ») dans les noms des premières grandes périodes de l'histoire de l'humanité (Paléolithique, Mésolithique, Néolithique), l'utilisation des ressources minérales est aussi ancienne que les premières traces de la présence humaine. »<sup>7</sup>

Au Paléolithique, les blocs de pierres étaient principalement ramassés dans les « zones d'éboulis, au pied des versants, à flanc de coteaux, dans le lit des cours d'eau ou encore sur les grèves et sur les plages. » Les roches utilisées servaient à l'homme d'outils, ainsi que tous les matériaux disponibles. Le silex a été le plus utilisé, pour ses qualités permettant la taille et sa forte présence dans les régions.

Pendant la période Néolithique (dès 5400 avant notre ère) la pélitequartz (roche gris-noire) était exploitée dans les carrières notamment dans le sud des Vosges pour fabriquer des lames. C'est à partir de 4500 avant notre ère que se développe l'exploitation des gisements de matière minérale (comme dans le Vaucluse au Mont Ventoux pour le silex blond). L'extraction se développe aussi dans le bassin parisien par puits de mines, chambres d'extractions ou galeries creusées dans les sous-sols calcaires grâce à des pics en bois de cerf ou en pierre, ce qui permettait d'atteindre les bancs de silex plus profond (pour la fabrication de haches polies).

---

<sup>7</sup>: Site de l'INRAP, *Dossier Archéologie des carrières*, Partie Préhistoire, Disponible sur : <https://www.inrap.fr/dossiers/Archeologie-des-carrieres/Histoire-de-l-extraction/Introduction#.X9YVGC3pM1g>



Photographies de Laurent Carozza et Jochen Jahnke

- « Mine de cuivre de Pioch Farrus, à Cabrières (Hérault). Exploitée dès le début du III<sup>e</sup> millénaire, elle est la plus ancienne mine de cuivre d'Europe occidentale. Le minerai de cuivre en était extrait par des tranchées et de petites galeries souterraines suivant l'axe des filons minéralisés. Ce type de mine pouvait se développer sur plus de 20 m et atteindre près d'une dizaine de mètres de profondeur. Les excavations, dont on aperçoit le départ sur ce cliché, ont été creusées après que la paroi rocheuse ait été « attaquée au feu » (technique du dépilage). » (INRAP)

- « L'oppidum de Bibracte était protégé par un puissant murus gallicus : cette technique de construction consiste en un talus de terre armé de poutres de bois entrecroisées, que vient renforcer un parement de pierres. Le mur de Bibracte mesurait plusieurs kilomètres de long. La masse de pierre nécessaire à son édification dépasse ce que le simple collectage du surface pouvait fournir, aussi est-il clair que des extractions du type des carrières à ciel ouvert ont eu lieu. » (INRAP)

Dans le milieu du IV<sup>e</sup> millénaire, d'importantes quantités de pierres sont nécessaires pour la création de sépultures composées d'amoncellement de cailloux dans le Finistère (Barnenez), les Deux-Sèvres (Bougon), Marseille (Saint-Jean-du-Désert) et dans les Pyrénées-Orientales (Caramany), par exemple. Par la suite, dolmens, allées couvertes, menhir et cromlechs perpétueront cette tradition mégalithique. Peu de carrières de pierre prévues pour l'édification de ces monuments sont connues.

L'arrivée de la métallurgie du cuivre marque la fin du Néolithique, et le début de la Protohistoire (-2200 à -52), les premières mines de cuivres arrivent aux alentours de 3000 avant notre ère dans le sud du Massif central. A Cabrières (Hérault) le minerai est extrait dans les galeries, puis transformé sur place : concassage, lavage, tri des matériaux extraits, fours, déchets,...

A l'âge de fer, l'exploitation connaît un véritable essor, avec l'extraction de fer dans des puits ou des galeries, avant d'être transformé. Au II<sup>e</sup> siècle avant notre ère, le fer qui affleure le sol était exploité à ciel ouvert à proximité des ateliers de transformation.

L'extraction de la pierre servait à l'époque gauloise à l'agriculture avec la pratique de l'épierrage, jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle. Cette pratique consiste à ramasser les pierres pendant les labours et les entasser au bout du champs pour former des murgers, permettant au villageois de se servir quand cela était nécessaire. L'extraction a, tout de même, continué dans les régions où la ressource en minéraux était importante. L'essentiel du bâti est en bois, mais la construction en pierre est pratiquée par les Gaulois et dans le sud de la France avec l'influence grecque.





Photographies de Denis Gliksman et Frédéric Gerber

- « Sur le site de la Corderie à Marseille, l'extraction de ce calcaire dit « de Saint-Victor » a laissé des traces sur près de 6 m de haut. Exploitée pendant plusieurs décennies aux VI<sup>e</sup> et Ve siècles avant notre ère, la carrière est abandonnée et comblée dans le premier quart du Ve siècle. » (INRAP)

- Les traces de réemploi dans l'antiquité : les rempart de Limonum ont été fait grâce à de la pierre prélevé dans les monuments de la ville (temples, thermes publics, forum, et stèles funéraires) après qu'ils aient été démonté. Les remparts découvert à Puygarreau à Poitiers, ont leurs fondations qui mesurent 6m de large sur plus de 2m de profondeur.

Pendant l'Antiquité (-52 à 500), l'utilisation et l'extraction de la pierre se poursuit. Les grecs avaient déjà importés des manières de construire dans le Sud, comme à Marseille où les maisons édifiées en briques de terre crue reposaient sur des solins de pierre.

Avant d'exploiter les carrières de pierre rose du cap Couronne au II<sup>e</sup> siècle avant notre ère, les pierres extraites pendant quatre siècles étaient un calcaire blanc dit "de Saint Victor". L'activité d'extraction a été intensifiée due à la demande croissante : pour la construction des centres de la société gallo-romaine (forum, amphithéâtre, thermes) et la multiplication de la construction privée en centre ville (domus) et rurale (villa).

Les carrières antiques étaient basées sur la technique de l'exploitation à ciel ouvert (sauf quelques exceptions dans l'ouest de l'Allemagne), les hommes recherchaient des endroits où les bons matériaux affleuraient.

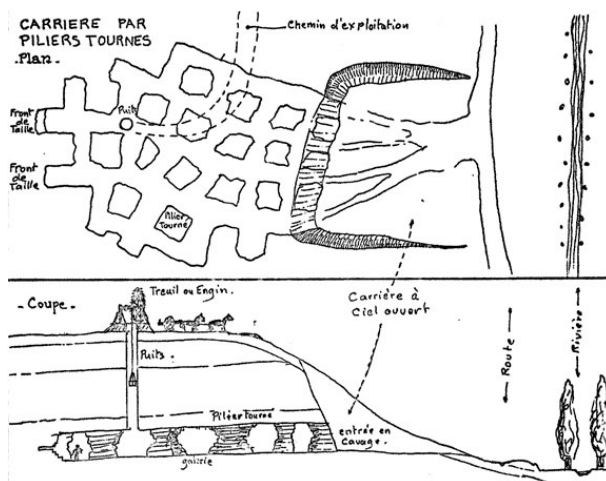
« Après avoir enlevé les matériaux médiocres et les terrains de recouvrement, on procédait à l'«abattage » de la pierre, c'est-à-dire à l'extraction proprement dite. Une fois dégagée la surface supérieure du banc à extraire, on traçait dessus les modules de base des blocs désirés. Puis on creusait au pic des tranches verticales. À l'issue de l'extraction, le carrier procédait à la première taille, qui consistait à donner au bloc les dimensions et la forme générale commandées par le constructeur. »<sup>8</sup>

La pierre à bâtir n'était pas la seule à être exploitée : le marbre aussi. « D'autres types de matériaux ont fait l'objet d'extraction : ceux que l'on doit transformer. Le premier est l'argile, dont sont faites les briques et les tuiles. Les « argilières » ont été exploitées, soit à ciel ouvert, soit par puits et galeries. [...] Quant au gypse, ses blocs cuits, broyés pour les réduire en une poudre ensuite recombinaée avec l'eau deviennent le plâtre. [...] D'autres matériaux, enfin, ont connu un usage encore plus discret : les cailloux concassés, sables, etc. qui ont servi de soubassement aux rues et aux routes antiques, en quelque sorte des granulats avant la lettre. »<sup>9</sup>

L'extraction de la pierre est ralentie à la fin de l'Antiquité dû à la chute de l'empire romain d'Occident. Certains murs d'enceintes ont été réalisés en réemployant des pierres d'édifices démontés ou de monuments funéraires.

<sup>8</sup> : Site de l'INRAP, *Dossier Archéologie des carrières*, Partie Antiquité, Disponible sur : <https://www.inrap.fr/dossiers/Archeologie-des-carrieres/Histoire-de-l-extraction/Introduction#.X9YVGC3pM1g>

<sup>9</sup> : Site de l'INRAP, *Dossier Archéologie des carrières*, Partie Antiquité, Disponible sur <https://www.inrap.fr/dossiers/Archeologie-des-carrieres/Histoire-de-l-extraction/Introduction#.X9YVGC3pM1g>



Photographie de Guillaume Martin et schémas de Marc Viré

- Vestige des carrières mérovingiennes du Clerfou, en Auvergne sur la commune d'Orchites (Puy-de-Dôme). Les blocs de trachyte extraits avaient des dimensions et les formes de sarcophages, les parois laissent apparaître les négatifs des blocs extraits qui montre une production quasi standardisée.

- Organisation des carrières souterraines au Moyen-Age « L'entrée de la carrière souterraine se faisait par une bouche de cavage. Comme il fallait soutenir les terrains sous lesquels on excavait, on laissait en place le dernier banc dur de la formation géologique de manière à former un plafond solide : le ciel de carrière. Les galeries d'extraction se recoupaient perpendiculairement, laissant à leur intersection des masses de pierre non exploitées, appelées piliers tournés. En bout de galerie se trouvait le front de taille. » (Les anciennes carrières du calcaire grossier à Paris)

Au Moyen-âge (500-1500), l'activité d'extraction continue grâce la production des sarcophages. Particulièrement en Auvergne où les roches volcaniques permettent la spécialisation de certaines carrières, par exemple "la domite" utilisée par les Gallo-Romains pour bâtir le temple de Mercure, qui une fois les blocs démontés, ont été utilisés pour réaliser des sarcophages.

Le véritable essort de l'extraction se fait au XII<sup>e</sup> siècle pour les constructions ou reconstructions des églises, cathédrales, château et enceinte, les grands chantiers ecclésiastiques et royaux sont très importants et permettent de développer et structurer l'activité d'extraction.

« Sous la pression de la demande, en étant obligés de progresser plus loin dans le cœur des collines, les carrières atteignent des masses de pierre de meilleure qualité. Puis, les quantités de matériaux de recouvrement devenant de plus en plus importants et complexes à enlever, ils passent en mode souterrain. »<sup>10</sup>

Les galeries étant de plus en plus longue et les trajets des charretiers devenant donc plus compliqués, dans le courant du XIII<sup>e</sup> siècle, les carrières optent pour une mutation technologique de première importance : ils percent des puits d'extraction bien après les entrées des galeries. Leurs savoirs sur les matériaux exploités s'affinant, les carrières peuvent distinguer la pierre de construction de la pierre pour la statuaire et les monuments funéraires.

Cette avancée dans les savoirs leur permet de découper dans le gisement et de tailler la pierre en fonction du sens dans lequel elle sera posée dans la construction. Soit elle sera coupée longitudinalement par rapport à la strate de sédimentation « sur le lit », soit perpendiculairement « en délit ».

Après la guerre de cent ans, certains lieux de production ont acquis une renommée qui fait que la dispersion des matériaux extraits s'élargie. Par exemple, les carrières de Saint-Leu-d'Essenrent dans l'Oise exporte une pierre jaune clair via les voies navigables du bassin de la Seine pour la construction de bâtiment à Paris, à Rouen, à Sens, à la fin du Moyen-âge. De même, pour le tuffeau de la vallée du Cher extrait dans les carrières de Bourré et de Saint-Aignan au XV<sup>e</sup> siècle, cette pierre légère et facile à tailler s'exporte à Tours et à Orléans.

---

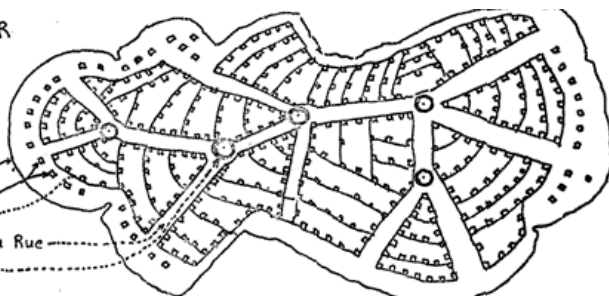
<sup>10</sup> : Site de l'INRAP, *Dossier Archéologie des carrières*, Partie Moyen-âge, Disponible sur : <https://www.inrap.fr/dossiers/Archeologie-des-carrieres/Histoire-de-l-extraction/Introduction#.X9YVG-C3pM1g>



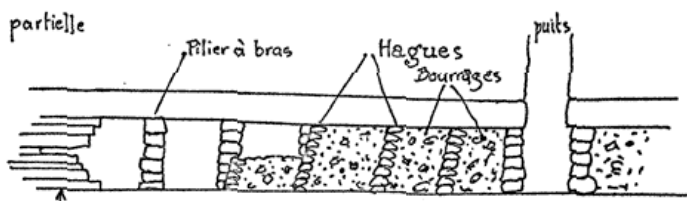
# CARRIERE PAR HAGUES-ET- BOURRAGES.

-Plan -

Front de taille  
Piliers à bras  
Hagues  
Charrière ou Rue  
Puits



Coupe partielle



Schémas de Marc Viré et photographie Guy Launay et Marc Viré

- Changement dans l'organisation des carrières souterraines « Dans les années 1480-1500, certains carriers jugèrent qu'en laissant en place des piliers de soutènement (les «piliers tournés»), ils se privaient de très bons matériaux. Aussi exploitèrent-ils non plus des galeries mais de vastes ateliers très bas, formant çà et là des empilements de blocs équarris, les «piliers à bras», et comblant les zones qui ne les intéressaient plus avec des déchets d'extraction dits «bourrages», qu'ils retenaient par des murets de pierre appelés «hagues». » (Les anciennes carrières du calcaire grossier à Paris)

- Photographie d'une lance utilisée par les carriers à la fin du XIXe jusqu'au début du XXe pour creuser verticalement dans la roche. Reconstitution en archéologie expérimentale par l'association Roches&Carrières à Eméville. (INRAP)



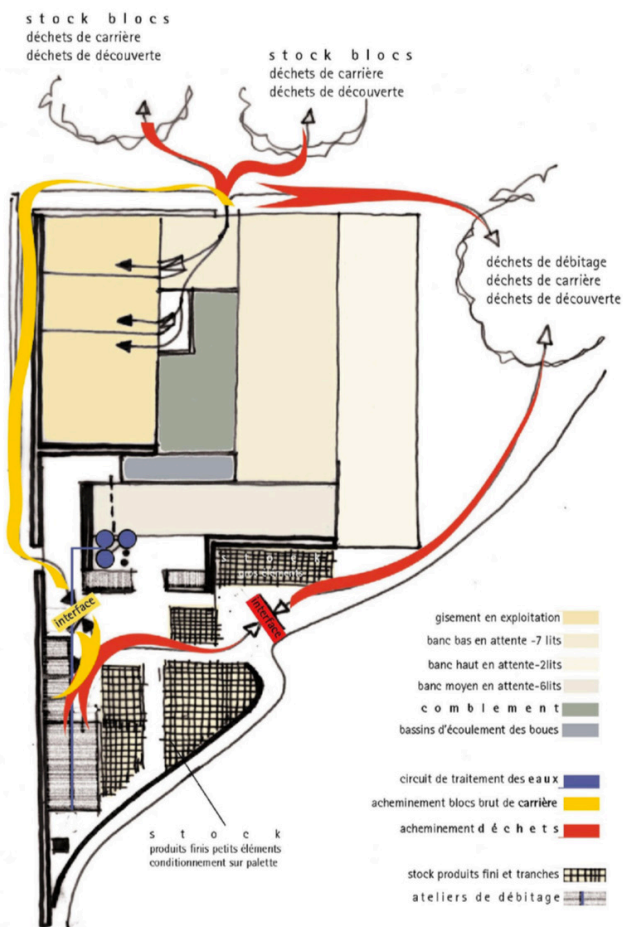
Le XVI<sup>e</sup> siècle, amène la spécialisation des centres de production, comme on peut le voir avec le tuffeau utilisé dans la construction des châteaux de la Loire. Durant la Renaissance, les pierres utilisées sont diverses en fonction de leur usage dans l'édifice (pierre d'appareil, pierre pour corniche et entablement, dalles pour le sol et les marches d'escalier,...). Les pierres utilisées proviennent des carrières locales mais aussi des carrières d'autres régions. Pour le transport, c'est la voie terrestre qui est le plus largement utilisée, mais lorsque cela est possible, la voie par l'eau lui est privilégié. Dans les régions qui n'ont pas de ressources lithiques, c'est depuis le Moyen-âge la brique qui est utilisée.

Le XIX<sup>e</sup> siècle est marqué par la construction de nouveaux canaux qui permettent d'améliorer les transports, mais aussi par l'arrivée des réseaux de chemin de fer dans les années 1830-1850. Ce qui permet notamment pendant la transformation de Paris par Haussmann une grande diversité dans les matériaux utilisés.

Les techniques d'extractions évoluent beaucoup au cours du XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle. Tout d'abord avec l'apparition de l'aiguille, une barre de fer d'environ 1,50m avec un court tranchant que le carrier utilise verticalement pour découper les tranches de blocs. Puis avec l'apparition de la lance, elle est plus longue et plus lourde, et est suspendue horizontalement à un châssis de charpente par une chaîne. Elle est utilisée comme un bélier dans la tranche de défermage.

Le sciage à la scie circulaire dans le front de taille apparaît à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et se perfectionne au cours du XX<sup>e</sup> siècle, qui devient la règle dans les carrières de roches sédimentaires.

Dans les roches plus dures, c'est l'explosif qui est le plus couramment utilisé. On fore alors la roche avec une perceuse des séries de trous profonds et alignés suivant le tracé et la profondeur du bloc à extraire. Les charges sont placées dans les trous, et à la mise à feu, le bloc est libéré de sa formation géologique.



L'extraction de la pierre est aujourd'hui faite essentiellement dans des carrières à ciel ouvert (les bancs peuvent se situer à des profondeurs variant de 2-3 mètres à 20-30 mètres), et plus rarement en galerie souterraine.

« Une carrière est la zone d'exploitation d'une matière première appartenant à un faciès géologique et possédant des qualités techniques et mécaniques qui intéressent les bâtisseurs. Ces derniers utilisent des matériaux extraits par des hommes, dans certains types de construction ou de production. Ces matériaux font donc l'objet d'un commerce avec tout ce que cela comprend : un transport, un coût, une organisation et différents intervenants. C'est selon ces axes de recherche que les carrières de La Couronne ont été abordées dans le but de réaliser une étude à la fois complète, concrète et surtout utile. »<sup>11</sup>

Dans les carrières à ciel ouvert, il faut d'abord enlever les couches de terrains inexploitable (entre quelques centimètre et plusieurs dizaines de mètres). Puis, le carrier passe à la phase d'extraction, où ils enlèvent des blocs de la masse les plus grands et réguliers possible. Ces blocs bruts sont, ensuite, transportés vers les ateliers pour être transformés.

Il y a trois techniques principales, qui seront développées juste après, lors de l'extraction des blocs de pierre dans les carrières à ciel ouvert : la coupe (sciage) grâce à un câble diamanté, la coupe à la haveuse et l'exploitation à l'explosif. Il est aussi possible d'extraire les blocs de pierre grâce à la découpe au jet d'eau, ou à l'aide de coins hydrauliques, mais ces techniques sont plus marginales.

---

<sup>11</sup> : Cécilia Pédini, *Les carrières de la Couronne de l'antiquité à l'époque contemporaine*, 2013, Publications du Centre Camille Jullian, pages 8-9



Photographies du sciage au fil diamanté, de la coupe à la haveuse, de l'exploitation à l'explosif.  
 Photographies du débit en tranche, du sciage au disque diamanté, du sciage au fil diamanté.  
 Photographies issues du site SNROC

Le sciage au fil diamanté : Le câble est formé par 2/3 torons d'acier à torsion alternée qui sont serties de perles diamantées. La longueur du câble varie, il vient s'accrocher à des poulies de renvoi actionnées par une machine électrique ou thermique qui permet de scier la masse.

La coupe à la haveuse : La haveuse ressemble à une tronçonneuse avec un bras pivotant autour d'un axe. Sur le bras une chaîne de dents en carbure de tungstène ou de pastilles diamantées scie verticalement ou horizontalement la masse. Le bras peut couper jusqu'à 5m.

L'exploitation à l'explosif : Le carrier perce des trous dans la masse d'environ 3cm de diamètre qu'il vient remplir d'explosif. La quantité est calculée pour ne pas abîmer le bloc et les qualités de la pierre. Cette technique est souvent présente dans les carrières de granit et de grès.

Les blocs peuvent faire jusqu'à 15/16 tonnes, ils sont déplacés par chariots élévateurs, grue ou derrick, et sont ensuite transportés dans les ateliers de transformation et de façonnages. La transformation s'effectue en 3 phases : la sciage primaire, le sciage secondaire et la finition. Ces trois phases vont être développées ci-dessous.

Le sciage primaire : Les blocs sont en tranche plus ou moins épaisses ou en bloc débités sur les 6 faces. Les machines utilisées sont aujourd'hui totalement automatisées avec des châssis mono ou multi-lames, formés de disque diamanté et de câble diamanté.

En fonction de l'épaisseur de tranche souhaitée on utilise un châssis multi-lames ou monolame. Selon la dureté de la pierre, le débitage est plus ou moins long. Les tranches sont ensuite entreposées. Le sciage par disque diamanté utilise généralement des disques de 3m de diamètre. Ils peuvent débiter les blocs en tranche ou en petit bloc avec un travail de coupe précis, avec la possibilité de faire des formes semi-arrondies. Le sciage au câble ou fil diamanté permet de découper des formes complexes directement dans le bloc.




---

Photographies des chaînes de découpe et machine a commande numérique  
 Photographies des machines et outils servant pour les finitions.  
 Photographies issues du site SNROC

Le sciage secondaire : suivant leur épaisseur les tranches sont destinées pour les plus minces à la réalisation de revêtements de sols, de façades, de murs et les plus épaisses seront débités en pavés, bordures ou monuments funéraires. Les formes peuvent variées et devenir complexes grâce aux outils numériques. Les éléments sciés sur 6 faces sont destinés à la réalisation de produit en 3 dimensions, par taille de pierre numérique ou manuelle. Ils sont destinés à la décoration du bâtiment, la construction en pierre massive, la restauration.

Les produits minces sont placés sur des chaînes de découpe de plus en plus sophistiquée qui permettent la découpe dans une dimension, mais surtout polissent, adoucissent, et brossent en fonction de la finition voulue.

Les machines à commandes numériques permettent de tailler en 3 dimensions pour réaliser directement les produits finis. Les robots peuvent reproduire le travail d'un sculpteur ou d'un tailleur de pierre qui interviennent dans la finition du produit pour le patiner, lui apporter de la lumière,...

La finition : Les carriers traitent les surfaces ce qui donne le caractère fonctionnel et esthétique de la pierre. Il y a différentes finitions : brute, adoucie, polie, brossée, flammée, bouchardée, layée, ciselée, bossée,...

Les calibreuses, chanfreineuses, moulureuses, profileuses, perceuses, ... permettent de donner des formes. La sableuse, bouchardeuse, layeuse, flammeuse, ... permettent de donner des aspects de finitions particulières. Le bouchardage ou d'autres finitions spécifiques sont faites manuellement.





Auparavant, chaque commune avait une carrière, car la pierre était difficilement déplaçable, il y avait donc, par rapport à aujourd'hui beaucoup, plus de carrières. Ce qui pose, désormais, problème pour remplacer les pierres des bâtiments patrimoniaux. Il faut pour les remplacer souvent trouver une autre carrière dont la roche a un maximum de ressemblance avec celle utilisée. Les caractéristiques de celle-ci doivent être similaires pour des questions notamment de statique mais aussi pour conserver la nature du bâtiment.

Comprendre et connaître les méthodes d'extractions à différentes époques permet de voir les évolutions et les compétences des travailleurs de l'époque dont est issu le bâtiment étudié. Ces études peuvent mettre en avant l'usage de nouveaux outils, qui remettent en question nos savoirs sur l'histoire et l'usage des outils. Ces connaissances donnent une première approche des savoir-faire qui ont été nécessaires pour construire.



Photographie de tailleurs de pierre sur un chantier de l'Yonne - Source : Rue des Lumières

## 2. De l'ébauche à la finition

Après l'extraction, les blocs de pierre sont retravaillés pour correspondre aux plans ainsi qu'à l'épure. Ce travail des blocs est fait par différents corps de métier : le tailleur de pierre, le sculpteur, ou encore le graveur.

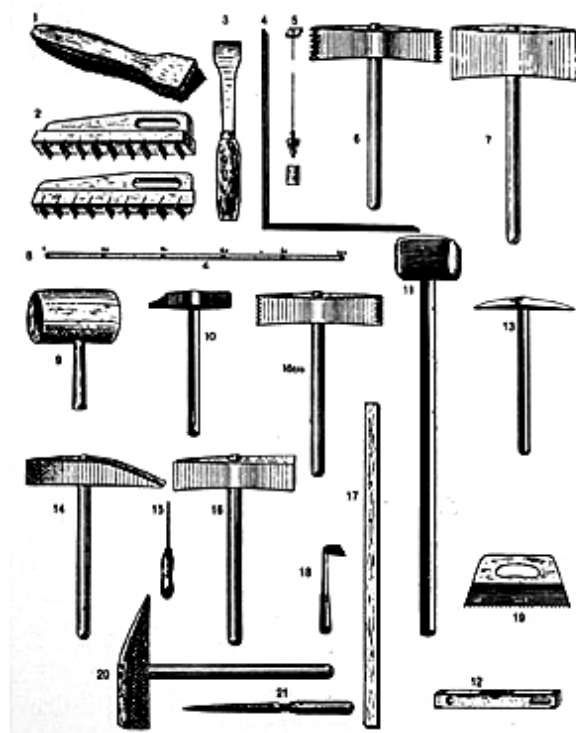
Le tailleur de pierre est un professionnel du bâtiment, apte à réaliser divers ouvrages de pierre pouvant entrer dans le cadre de la construction et de la restauration de bâtiments. Ses compétences vont du simple relevé (croquis) à l'esquisse, l'étude de l'appareillage ou de plans de calepinage, la réalisation de volumes taillés pouvant constituer tout ou une partie d'un ouvrage du bâtiment, jusqu'à sa pose. Ses connaissances sont d'ordre technologique et architecturale.

Le tailleur de pierre travaille sur chantier comme en atelier. Il utilise des outils traditionnels mais aussi des machines à commande numérique. Il sait implanter un ouvrage au sol, étayer les appareillages lors de la pose, poser les blocs de pierre, effectuer les raccords d'enduit.

Le sculpteur, du latin "sculpere" qui signifie "tailler" ou "enlever des morceaux à la pierre", crée à partir des blocs de pierre extraits, des éléments de décoration tel que les sculptures, les bas-relief en enlevant de la matière au bloc. Ils peuvent travailler directement sur les blocs sans dessin, plan, en ne réalisant que quelques lignes sur le bloc directement, ou alors réaliser des modelages en argile pour préparer la sculpture.

Le graveur écrit sur les éléments en pierre, leurs inscriptions calligraphiques peuvent se voir sur les plaques des rues, les catacombes. Il vient créer en creusant ou en incisant la pierre.

Les outils comme les techniques d'extractions ont évolué au cours du temps. Nous l'avons vu l'utilisation de machine numérique permet une transformation des blocs de pierre plus aisée, mais les outils traditionnels sont encore aujourd'hui utilisés pour travailler la pierre. Ils sont souvent favorisés dans l'apprentissage du travail de la pierre, mais aussi pour les finitions ce qui permet une plus grande précision, cependant les outils mécaniques sont utilisés pour des tâches complexes.



1. Chasse.
2. Rabotins.
3. Ciseau.
4. Équerre.
5. Fil à plomb.
6. Grain d'orge.
7. Taillant.
8. Mètre.
9. Maillet.
10. Marteau bretté.
11. Masse de fer pour fendre et abattre la pierre
12. Niveau à bulle d'air.
13. Pioche.
14. Polka.
15. Pointe à tracer.
16. Marteau taillant.
- 16<sup>bis</sup>. Marteau taillant à dents.
17. Règle.
18. Ripe.
19. Sciote.
20. Têtu.
21. Tire-point.

L'outil est un « objet fabriqué, utilisé manuellement, doté d'une forme et de propriétés physiques adaptées à un procès de production déterminé et permettant de transformer l'objet de travail selon un but fixé. ».<sup>12</sup>

Ils ont évolué en même temps que l'homme, on peut distinguer dans l'histoire quatre périodes dans l'évolution des techniques de création. La première, lorsque les hommes utilisaient des objets naturels qu'ils trouvaient à portée de main. La seconde période correspond au moment où l'homme modifiait ses outils avec ses doigts ou ses dents. La troisième période est celle où les objets étaient transformés par d'autres objets, cette évolution dans les outils apparaît à moins 2 millions d'années avant Jésus Christ. La quatrième période est celle de la fabrication d'outils, cette évolution permet la création d'une vraie industrie (couteau, burin, hache,...). La technique du feu permet de faire avancer et évoluer leur fabrication.

Les outils qui permettent de travailler la pierre sont nombreux mais ne sont pas tous utilisés par le tailleur de pierre, le sculpteur et le graveur. Chacun utilise des outils spécifiques à sa pratique et en fonction de la dureté de la pierre qu'il travaille.

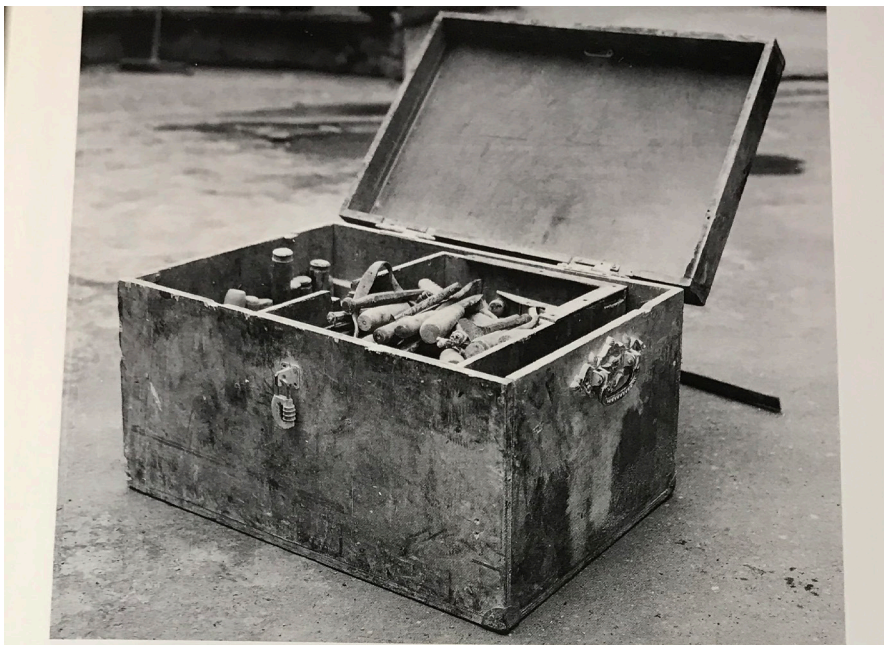
Les outils pour travailler la pierre peuvent se classer en fonction du corps de métier qui les utilisent, de la dureté de la pierre qu'ils permettent de travailler, ou en fonction de leurs formes. Plus généralement, les outils faits de manche en bois sont utilisés pour travailler les pierres tendres, et ceux ayant un manche en métal servent pour les pierres moyenne à dure. Les pierres très dures sont travaillées par des outils avec des éléments tranchants renforcés en tungstène.

Dans le classement des outils, nous pouvons distinguer cinq catégories qui les séparent en fonction de leurs formes et de la façon dont ils sont utilisés. On a les percussions lancées, les percussions posées, les outils de mesures, auxquels viennent s'ajouter les outils modernes (haveuse à chaîne, burin à air comprimé,...) qui sont apparus avec la mécanisation et l'électricité.

---

<sup>12</sup>: Définition du CNRTL. Disponible sur : <https://www.cnrtl.fr/definition/outil>





Caisse à outils de tailleur de pierre, Photographie An My Lê, Source : Encyclopédie des Métiers, *La maçonnerie et la taille de pierre*, Paris, 2007, Librairie du Compagnonnage, Tome 5



Tout d'abord les percussions lancées, les outils qui s'y trouvent sont formés d'un manche et s'utilisent directement en tapant sur la pierre. La plupart servent lors de la taille du bloc à la sortie de la carrière pour les dégrossir, mais certains permettent des finitions précises tels que le taillant.

Nous pouvons aussi distinguer les percussions posées avec percuteurs, qui désignent les outils qui sont propulsés contre la pierre avec un percuteur (maillet, massette,...). Ils sont utilisés pour enlever l'excédent de matière sur le bloc, le sculpteur les utilise souvent.

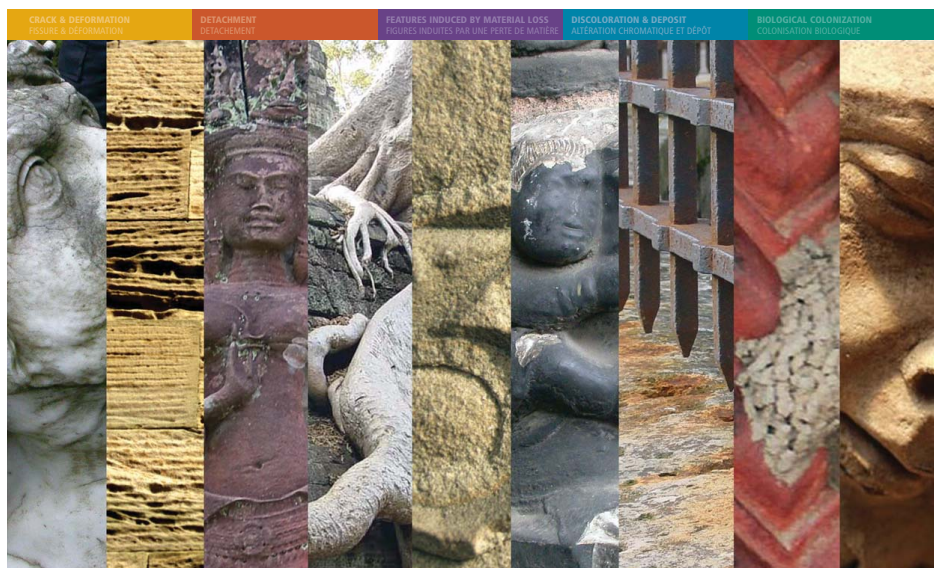
Les percussions posés à la main s'utilisent sans percuteur, et apparaissent vers la fin de la taille du bloc pour régler les finitions, mais l'on y trouve aussi les éléments de découpe comme les scies.

Les deux dernières catégories d'outils sont les outils de mesure (règles, compas,...) et les outils modernes qui sont apparus au XXe siècle avec la mécanisation et l'électricité. Aujourd'hui, on utilise des outils traditionnels, comme des machines à commande numérique.

Lors de l'ébauche et jusqu'à la finition du bloc de pierre, nous pouvons distinguer différents « outils traditionnels »<sup>13</sup> : les abrasifs, la boucharde, la brettur, la broche, la chasse, le chemin de fer, le ciseau à pierre, le ciseau baucharde, le ciseau grain d'orge, le foret, la gouge, la gradin, le maillet, le marteau grain d'orge, le marteau taillant, le marteau têt, la massette, la patente, le pic, la polka, le racloir, la râpe à pierre, la ripe, la scie à pierre, la sciotte.

---

<sup>13</sup> : Encyclopédie des Métiers, *La maçonnerie et la taille de pierre*, Paris, 2007, Librairie du Compagnonnage



### **c. Les altérations de la pierre et les facteurs qui les influencent**

La pierre, une fois mise en œuvre, est soumise à son environnement et à l'usage du bâtiment. Avec le temps, les pierres vont subir des altérations.

Le glossaire de l'ICOMOS recense les termes qui sont utilisés pour parler de la pierre, il permet de mettre d'accord tous les scientifiques sur la définition des termes et d'utiliser un vocabulaire commun que tous peuvent comprendre.

Le glossaire commence par une définition de terme généraux : altération, dégradation et altération météorologique.

L'altération est définie comme la « modification du matériau n'impliquant pas nécessairement une dégradation de ses caractéristiques du point de vue de sa conservation. Par exemple, un revêtement réversible appliqué sur une pierre peut être considéré comme une altération. »<sup>14</sup>

La dégradation, elle correspond à « toute modification chimique ou physique des propriétés intrinsèques de la pierre, conduisant à une perte de valeur, de qualité ou à une entrave à son utilisation. »<sup>15</sup>

Pour finir l'altération météorologique est expliquée comme la « modification des propriétés physicochimiques de la pierre par les agents atmosphériques naturels. »<sup>16</sup>

Chaque pierre évolue dans le temps différemment en fonction de ses caractéristiques et de l'environnement dans lequel elle se situe. Il est, en ce sens, difficile de prévoir et de contrer en avance les altérations qui vont apparaître dans le bâtiment.

L'étude de l'altération des pierres à bâtir se fait en deux directions. Tout d'abord, avec l'analyse de la qualité des roches et de leurs caractères minéralogiques et pétrographiques. Puis, par l'analyse des différentes influences des facteurs d'altération.

---

<sup>14</sup> : ICOMOS, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, page 8

<sup>15</sup> : ICOMOS, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, page 8

<sup>16</sup> : ICOMOS, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, page 8

## PERFORATION . PERFORATION



**Perforation** by marine lithophagous organisms on a limestone sphinx found during undersea excavations after an immersion of several centuries.

**Perforations** par des organismes marins lithophages sur un sphinx en calcaire trouvé au cours de fouilles sous-marines après un séjour sous l'eau de plusieurs siècles.

*Egypt, Alexandria, Kom el Dikka open air museum, 2006. CICRP / P. Bromblet*

Les examens microscopiques donnent des informations importantes sur la qualité de la pierre et son caractère minéralogique et pétrographique,... , complétés par des épreuves chimiques, des essais mécaniques. Mais pour Alois Kieslinger <sup>17</sup>, ces essais ainsi que ceux fait en extérieur ne permettent pas de reproduire la situation particulière des pierres constituant un édifice.

De plus, dans une même carrière, les pierres peuvent avoir des qualités différentes en fonction du banc à partir duquel elles ont été extraites, il faut donc faire attention aux généralisations.

Le principal facteur d'altération est l'eau ; les roches ont des comportements différents vis à vis de l'eau. Certaines plus poreuses laissent pénétrer et passer l'eau, tandis que d'autres sont imperméables. L'humidité peut provenir de différentes sources, et sous différentes formes, elle amène des altérations chimiques et physiques.

L'humidité peut provenir de la carrière, lorsque les pores des pierres sont remplies d'humidité et que la pierre n'a pas assez séché ; l'humidité stockée à l'intérieur peut geler. Le gel peut aussi provenir des autres types d'humidités et fait éclater la pierre en augmentant le volume initial d'eau de 9%.

L'humidité apportée par la pluie et la brume est très visible sur les pierres solubles par une corrosion chimique. Elle est la cause principale de la formation de croûtes.

L'humidité peut aussi provenir du sol, l'humidité du sol enrichie par les sels solubles remonte par capillarité, elle quitte le mur en s'évaporant mais les sels solubles eux restent et cristallisent. Ce qui provoque une accélération du développement des croûtes et qui se fait dans toutes les pierres.

---

<sup>17</sup>: Alois Kieslinger, *Les principaux facteurs d'altération des pierres à bâtir*

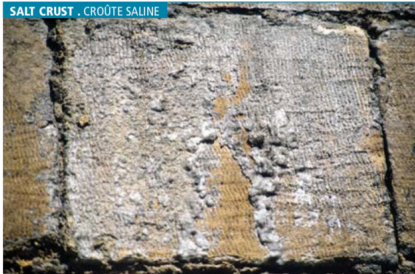
**BLACK CRUST . CROÛTE NOIRE**



**Black crust** tracing the surface of a limestone sculpture.  
Sculpture en pierre calcaire, recouverte d'une **croûte noire** d'épaisseur homogène.

France, Saint-Denis, Basilique, 2006. Photo height : ca. 30 cm. LRMH / V. Vergès-Belmin

**SALT CRUST . CROÛTE SALINE**



Porous limestone, **salt crust** (halite).

**Croûte saline** (halite) développée sur un calcaire poreux.

Egypt, Cairo, Mosque, 2000. Stone width : ca. 30 cm. Geol. Inst. / Aachen Univ. / B. Fitzner



La formation de croûte sur la pierre est une altération très commune. La croûte est créée par l'évaporation de l'humidité qui laisse un amas de substance qu'elle avait transporté dans la pierre, et qui se consolide de différentes manières (formant des plaques de quelques millimètres sur l'extérieur de la pierre ce qui change sa structure et sa couleur, en forme de stalactites ou staphylins). Cette croûte dans les grandes villes est, souvent, ensuite noircie à cause de la pollution.

La formation de ces croûtes est impactée par des facteurs extérieurs : La pluie ralentie ou arrête ces formations, l'ajout d'enduit sur la pierre l'empêche de respirer ce qui accélère sa désagrégation.

Les changements de température créent aussi des altérations. Ces changements répétés peuvent diminuer la qualité des matériaux. Ce facteur provoque des altérations, principalement dans les régions arides. Par exemple, la relaxation de la pierre suite à un important apport de lumière crée des fissures.

Lors d'un incendie, le feu réchauffe rapidement les parties extérieures de la pierre qu'il lèche et crée une rapide dilation. Mais l'intérieur reste lui froid ce qui provoque des tensions et fait éclater par morceaux et plaques la pierre. L'échauffement des pierres crée, aussi, un changement de coloration.

D'autres facteurs influencent les altérations tel que l'activité des organismes, comme le sable qui est porté par le vent qui corrode la pierre, mais aussi les tensions résiduelles et les relaxations à l'intérieur même de la pierre qui crée des déformations, ou encore les dégâts indirects ou techniques.

« Il faut se garder des généralisations, renouveler sans cesse les observations, multiplier les expériences chimiques, microscopiques, photographiques, etc., même dans un cas qui semble banal au premier coup d'œil. C'est, ainsi, seulement que l'on arrivera à détecter la cause des phénomènes, à préciser un diagnostic fondé et autorisé. Car le diagnostic révèle, sinon les moyens, tout au moins le principe de la thérapeutique à mettre en œuvre. »<sup>18</sup>. Comme l'explique ici Alois Kieslinger, il est important de comprendre les facteurs qui ont amené à l'altération de la pierre pour avoir une réponse adaptée lors de la restauration.

---

<sup>18</sup>: Alois Kieslinger, *Les principaux facteurs d'altération des pierres à bâtir*, page 19



## **II. La datation, l'une des études et recherches les plus importantes dans la connaissance du patrimoine**

---



Dans la recherche sur les bâtiments patrimoniaux, la datation est un élément très important. Elle permet de replacer les savoir-faire utilisés dans la construction du bâtiment, dans l'histoire et d'apporter des informations sur l'édifice et sa création.

La datation est une méthode qui peut se faire de deux manières, soit absolue, soit relative. La datation absolue donne des informations chiffrées de l'âge d'un objet, d'un événement. La datation relative, elle se base sur des analyses comparatives, et permet de classer et d'organiser chronologiquement des événements géologiques ou autres. Le choix d'une datation ou d'une autre dépend du matériel accessible, du type d'analyse prévue (invasive ou non-invasive), de la méthode de recherche employée et des objets analysés.

La datation absolue nécessite généralement une analyse en laboratoire et se base sur des analyses physico-chimiques. Les méthodes d'analyse qui permettent d'obtenir une date chiffrée de l'élément analysé sont, par exemple, la dendrochronologie, les méthodes isotopiques, les méthodes du physique de l'élément,...

La datation relative, quant à elle, se base sur un corpus d'élément similaire déjà établi ou en établissant une chronologie des éléments présents sur le site d'étude. Les méthodes utilisées sont, par exemple en archéologie, la stratigraphie, la typochronologie, la sériation,...

La datation peut être faite sur différentes parties d'un bâtiment et sur différents matériaux. Elle peut aussi se baser sur les écrits : les récits, les représentations, ... Différents savoirs et professionnels sont impliqués pour dater un bâtiment patrimonial, l'archéologue du bâti, l'historien de l'art, le dendrochronologue, le scientifique en laboratoire, ...

Dans cette partie, nous allons voir différentes méthodes de datation et de création de savoir autour d'un bâtiment patrimonial en prenant principalement l'exemple de l'Eglise de la Madeleine. Cette église située à Aix-en-Provence dans les Bouches-du-Rhône, fermée au public depuis 2006, est aujourd'hui toujours en restauration. Ces campagnes de restauration ont donné lieu à des recherches et études archéologique, dendrochronologique, architecturale, documentaire,...





## **a. Les écrits : première source de savoir et d'encrage de la datation**

La première source qui permet d'avoir une datation plus ou moins précise est celle des écrits. Ils permettent une première approche de l'histoire du bâtiment. Ces écrits sont constitués de plan, de coupe, de façade, de documents techniques faits par les architectes et constructeurs du bâtiment. Mais, il est également possible de trouver des informations sur l'histoire et l'évolution du bâtiment grâce aux contrats, aux récits, aux textes officiels, ...

Dans le cadre des campagnes de restauration de l'Eglise de la Madeleine, des recherches documentaires ont été mises en place. Ce qui a permis une première connaissance sur l'histoire de l'édifice.

L'Eglise de la Madeleine est construite avec deux types de pierre, la pierre de Bibémus, qui a des couleurs jaunes et roses, et une pierre provenant du Var, qui a des couleurs jaunes.

Les carrières de Bibemus sont situées à 5km à l'est d'Aix-en-Provence, et ont une superficie de 7 hectares. Les blocs de pierre y étaient extraits à ciel ouvert, de l'antiquité romaine jusqu'au 19ème siècle. Les pierres extraites ont servi dans la construction de nombreux bâtiments de la ville. L'arrêt de l'extraction dans ces carrières serait dû à l'utilisation de la pierre de Rognes au 19e siècle. La pierre qui y était extraite est sablonneuse, très ocre. Elle est issue du compactage du Burdigalien, on y trouve notamment quelques coquillages.

Aujourd'hui, la pierre de Bibemus n'étant plus extraite, il a fallu trouver une pierre de remplacement. La difficulté est de trouver quelle pierre, provenant de la région, va pouvoir être utilisée pour assurer les remplacements nécessaires, tout en évitant une augmentation du coût de celle-ci. Mais surtout, il faut que cette nouvelle pierre ressemble physiquement et mécaniquement à celle utilisée lors de la construction. Pour faire leur choix, les architectes et maîtres d'ouvrages ont fait venir des échantillons de pierre de différentes carrières. C'est la pierre de Fontvieille qui a été choisie, provenant des Alpilles, cette pierre a remplacé la pierre d'origine de la façade du 19e siècle.





Le quartier Bellegarde et la place des Prêcheurs au XVI<sup>e</sup> siècle (extrait du plan d'Aix-en-Provence par François de Belleforest, 1573-1575). Q : église des Prêcheurs.

Source : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en- Provence, France. pp.151-170. hal-02143984, page 5

L'Eglise se situe dans le centre d'Aix-en-Provence, au Nord-Est de la Place des Prêcheurs. Elle est fermée au public depuis 2006, pour permettre de commencer les programmes de consolidation et de restauration du bâtiment. Les recherches historiques et archéologiques menées depuis 2012 par la Direction Archéologie et Muséum de la Ville d'Aix-en-Provence, s'inscrivent dans ces programmes.<sup>19</sup>

L'Eglise de la Madeleine anciennement l'Eglise des Prêcheurs, s'établie à Aix-en-Provence en 1272, avec l'arrivée d'une communauté de moines Dominicains, elle est créée avec un couvent accolé à l'église sur son bas-côté au Nord. A Aix-en-Provence, il est possible de remarquer un important maillage religieux qui s'installe au XIIIe siècle et se poursuit ensuite avec l'arrivée de nouvelles fondations comtales. L'Eglise de la Madeleine a été l'église conventuelle de cette communauté de frères Dominicains jusqu'à la Révolution, puis elle est devenue paroissiale, comme on la connaît aujourd'hui.

L'Eglise des Prêcheurs d'Aix-en-Provence s'installe en marge des bourgs à moins de 40 mètres des remparts. « Pour cet ordre qui a placé la ville au cœur de sa pastorale, cette situation péri-urbaine offrait un espace suffisant à l'emprise foncière de ses locaux et à leurs développements ultérieurs, tout en plaçant les religieux au contact des fidèles habitant les faubourgs populeux et dynamiques constitués aux portes de la ville, auxquels ils adressent leurs prédications et dont ils peuvent capter les aumônes. »<sup>20</sup>

---

<sup>19</sup> : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en-Provence, France. pp.151-170. hal-02143984

<sup>20</sup> : Idem, page 4



Représentation de la place et de l'église des Prêcheurs, entre 1835 et 1840, attribuée à Marius Re naud (cl. B. Terlay, Musée Granet d'Aix-en-Provence).

Source : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en- Provence, France. pp.151-170. hal-02143984, page 14



L'édifice fait 63 mètres de long sur 27 mètres de large. Les dispositions de l'église au Moyen-Age, n'ont pas pu être mises en avant, bien qu'on nomme l'église dans la documentation de l'époque. Un incendie a été évoqué en 1383, par la littérature érudite du XVII<sup>ème</sup> siècle, mais n'a pas pu être prouvé.

« Environ ce temps & l'an 1383, le feu prit au Convent des Freres Prêcheurs de la ville d'Aix, mais en telle façon qu'il brûla entierement tout le Cloître & les anciens documens de la Maison, laquelle depuis cette incendie commença d'avoir une autre forme qu'elle n'avoit pas auparavant » (Bouche 1664, T.II, 399). « L'incendie de MCCCLXXXIII qui brûla entierement l'Eglise & le Cloître, nous a privés de sçavoir plusieurs très belles choses, qui se sont passées dans cet Ordre, & qui appartiennent à la Ville d'Aix » (Pitton 1668, 138) ; Montagnes 1979, 58. »<sup>21</sup>

La reconstruction de l'église est avérée en février 1384 dans les écrits.

« Dès le milieu du XIV<sup>e</sup> siècle, les abords de la nef et du chœur sont ainsi investis par des chapelles privées, familiales ou de confréries comme celle de saint Pierre, martyr connue dès 1420 »<sup>22</sup>

Des recueils de titres, des actes et des documents relatifs au couvent des Prêcheurs conservés notamment aux Archives départementales des Bouches-du-Rhône, relatent les coutumes de ces familles qui investissaient les abords de la nef, et donnaient de l'argent pour assurer les prières, l'entretien annuel, ...

Au XV<sup>ème</sup> siècle, les toitures et charpentes sont de nombreuses fois reprises. Les écrits précisent que pour certaines demandes, les frères Prêcheurs demandent au maître charpentier de réutiliser au mieux les tuiles et bois présents.

---

<sup>21</sup> : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en- Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en- Provence, France. pp.151-170. hal-02143984 , page 6

<sup>22</sup> : Idem, page 12

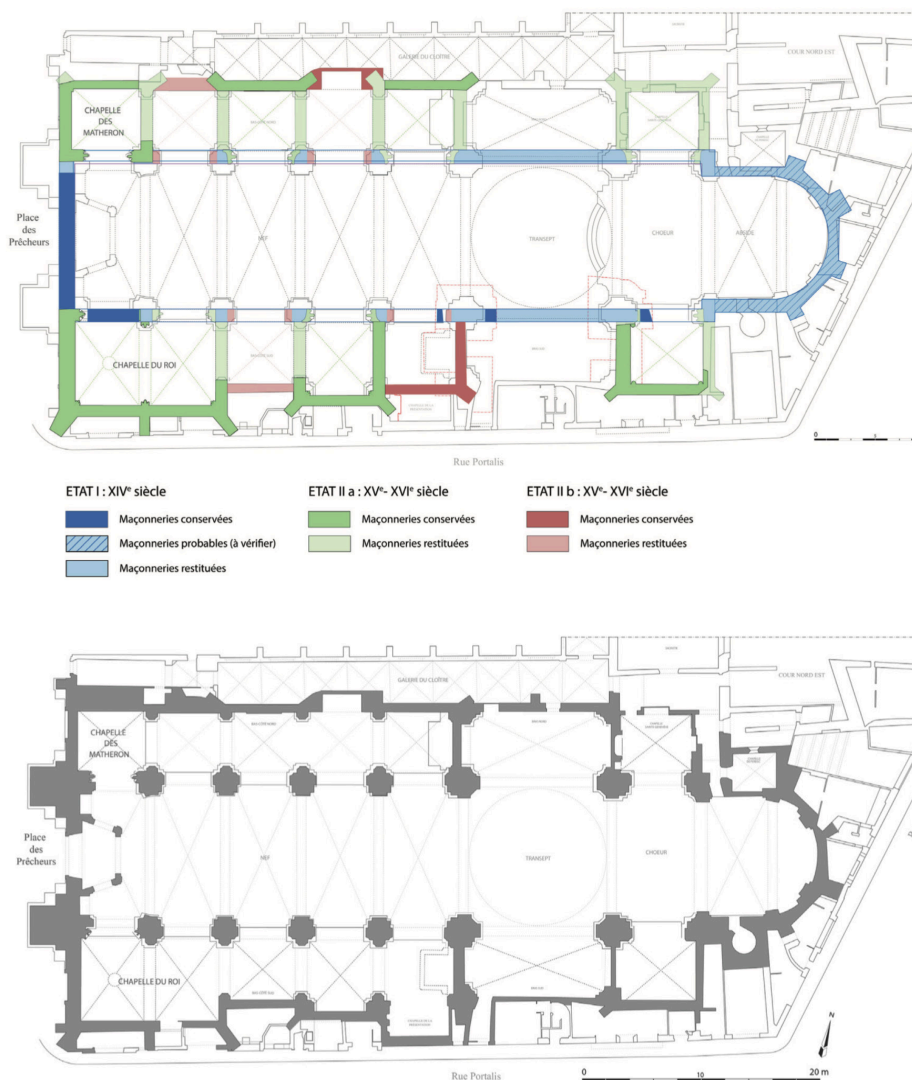


Fig. 15 – Plan actuel de l'église de Prêcheurs (DAO: M. Panneau).

Plans à différentes époques de l'Eglise de la Madeleine

Source : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en- Provence, France. pp.151-170. hal-02143984 , page 6 et 17

Les frères dominicains confient, aux maîtres maçons et architectes Jean et Laurent Vallon, le 28 juillet 1691, la rénovation de l'église. Ils ont, entre 1691 et 1703, réalisé des travaux qui donnent à l'édifice ses dispositions actuelles, mais aussi son architecture classique, qui ne permettent que difficilement de percevoir les campagnes de construction qui ont débuté à la fin du XIII<sup>e</sup> siècle.

« Les travaux, dont Jean Boyer a minutieusement restitué le détail, se sont échelonnés jusqu'en 1703, gommant, sans pour autant totalement les effacer, les multiples campagnes de constructions qui les ont précédés depuis la fin du XIII<sup>e</sup> siècle et ont servi de base à leur projet. »<sup>23</sup>

Les textes restent très évasifs au sujet de cette restauration, et ne permettent pas d'avoir une connaissance précise de cette campagne de travaux.

Cependant, nous savons grâce à ces textes que depuis le XVII<sup>e</sup> siècle, l'Eglise prend l'habitude de louer les espaces extérieurs entre les arcs boutant à des familles pour y installer leurs commerces et leurs habitations. Au cours du temps, les arc-boutants sont démolis et grignotés, pour pouvoir construire des habitations plus grandes et rentabiliser l'espace foncier. Malheureusement ces méthodes impactent la stabilité de l'édifice.

Au XX<sup>e</sup> siècle, la mairie achète ces espaces qui sont aujourd'hui des magasins, tout comme les échoppes créées au départ, mais ces constructions ne sont plus habitables car trop petites. Certaines de ces constructions n'ont, de plus, plus une structure sûre.

Ces documents relatant l'histoire de l'église permettent d'avoir une première approche de l'histoire de celle-ci. Certains faits ont pu, grâce aux études archéologiques et dendrochronologie que nous verrons par la suite, être confirmés.

Aujourd'hui, la numérisation de ces écrits permet de faciliter les recherches, et de garder et conserver numériquement et durablement des documents papiers qui peuvent s'abîmer et disparaître.

---

<sup>23</sup> : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en-Provence, France. pp.151-170. hal-02143984, page 5





Photographie personnelle de l'Eglise de la Madeleine, Aix-en-Provence, Octobre 2020

## **b. Le style architectural : une approche visuelle**

A la suite de cette première approche immatérielle de l'édifice, nous avons pu visiter l'Eglise de la Madeleine. Lors de cette première visite de nouveaux éléments visuels, qui ne pouvaient être perçus dans les écrits, ont pu nous donner des indications sur la datation de l'édifice.

Cette seconde approche est celle du style architectural. Cette analyse est non invasive, et principalement faite à l'œil nu. Elle s'inscrit dans la datation relative, elle nécessite de faire des comparaisons avec d'autres édifices et l'histoire de l'art que nous connaissons.

Pour l'Eglise de la Madeleine, cette datation est multiple puisque, comme nous avons pu le voir, l'église a été réalisée en plusieurs phases. La façade actuelle porte le style classique monumental, porté par les reconstructions demandées par Napoléon III. Nous pouvons voir différentes couleurs et matériaux qui jouent sur les éléments constituant la façade (colonne, décors, chapiteaux)... L'ancienne façade était dégradée et non finie, sûrement par manque de moyen. C'est donc au XIX<sup>ème</sup> siècle que les architectes Vallon sont chargés de refaire la façade. Il s'agit de la nouvelle façade que l'on connaît actuellement, plaquée contre l'ancienne façade, et qui ne comporte aucun élément de structure.

L'intérieur lui porte les marques d'un style plutôt austère, avec un ancien oculus, ce qui fait penser à une église du Moyen-Age, et qui confirme les dates trouvées dans les écrits concernant les premières constructions de l'église. La marque de l'église du Moyen-Age est surtout visible au niveau de l'emprise et du plan de l'édifice. Le vaisseau central de la nef ainsi que le transept et les chapelles portent les marques d'une architecture moderne.



Photographie personnelle de l'Eglise de la Madeleine, Aix-en-Provence, Octobre 2020

Dans ce mémoire, il apparaît opportun de s'intéresser à une partie en particulier de l'église : la chapelle des Matheron. Cette chapelle a été, d'après les écrits, construite au XV<sup>ème</sup> siècle, en même temps que la chapelle du roi. Ce sont les seules chapelles qui n'ont pas été reprises lors de la rénovation des frères Vallon et dont les pierres sont toujours apparentes. La chapelle des Matheron est apparue comme un espace propice à la recherche des traces d'outils et des altérations dont nous parlerons par la suite.

« À l'opposé de cette dernière [la chapelle du roi], la chapelle des Matheron est également désignée sous le vocable de Notre-Dame du Saint-Rosaire. Elle tient ce nom de la confrérie installée en 1500 par René Matheron, seigneur de Peynier et filleul du roi René, dans la chapelle familiale où il demande à être inhumé le 11 mai 1512. Entièrement montée en pierre de taille et dallée du même matériau, la chapelle des Matheron se développe sur une seule travée de plan presque carré, couverte d'une voûte d'ogives dont les nervures moulurées en doucines et cavets reposent sur des culots armoriés. Elle s'ouvre sur le vaisseau central de la nef par une grande arcade brisée reçue au niveau du sol sur des bases prismatiques et parcourue par une moulure continue à la modénature accentuée, où s'enchaînent doucines et scoties. Les parois murales de la voûte comme celles des murs latéraux ont été uniformisées par un badigeon à la chaux ocre pour recevoir des faux-joints peints restituant un appareil factice régulier qui constitue le décor primitif de la chapelle. »<sup>24</sup>

Aujourd'hui, une partie de la chaux qui recouvrait les murs n'est plus présente. De plus, une cloison de bois a été montée pour séparer la chapelle des Matheron du bas-côté lors de la restauration des frères Vallons. Elle est la seule, avec la chapelle du roi, qui n'a pas été démembrée pour être intégrée aux bas-côtés.

Pour avoir des informations et des mesures plus précises pour la comparaison avec des édifices et styles architecturaux connus, il est possible en plus d'un relevé visuel, de réaliser des relevés avec des outils numériques tels que le laser et l'appareil photographique.

---

<sup>24</sup> : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en-Provence, France. pp.151-170. hal-02143984, page 14-15





DANS LES ZONES PLUS COMPLEXE

PRISE DE VUE EN ÉTOILE



→ PRISE PHOTOS  
recouvrement  
60 % d'une  
photo à l'autre

La photogrammétrie est une technique qui permet, à partir de photographies prises d'un objet, de reconstruire un modèle en 3 dimensions. La photogrammétrie permet d'obtenir des informations géométriques, de couleur et de surface de l'objet étudié.

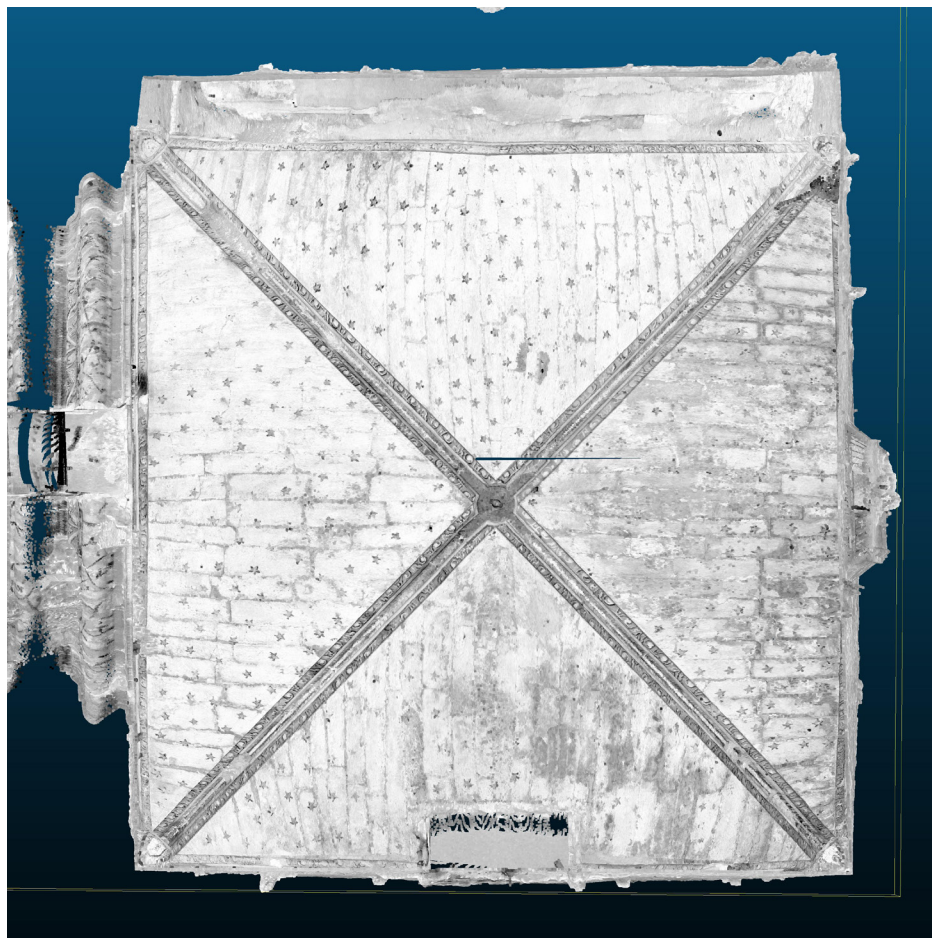
Dans le cadre de ce mémoire, avant la visite sur le site, un protocole de relevé a été proposé afin de faire un relevé et d'obtenir un nuage de point de l'église.<sup>1a</sup> Seulement une fois dans l'église, nous avons pu nous rendre compte que la chapelle des Matheron est complètement dans le noir. Ce qui sans le matériel lumineux adéquat ne permet pas le relevé photogrammétrique. Le relevé photogrammétrique d'un objet fait sous une lumière contrôlée permet de meilleur résultat qu'un relevé fait en extérieur sous l'influence de la lumière du soleil. Car cette lumière peut varier au cours de la prise photographique et faire évoluer les couleurs et les ombres, ce qui amènera des incohérences et des approximations entre les données récoltées.

La photogrammétrie fonctionne avec le principe de la corrélation d'image et la reconnaissance de pixel analogue. Si ce relevé avait été effectué avec la mise en place d'un nouveau protocole, les données photographiques auraient été ouvertes dans le logiciel Metashape afin de créer un nuage de points. Ce nuage de points aurait pu permettre de générer des orthophotographies, de mesurer un fois la mise à l'échelle faite des éléments, et d'enregistrer un relevé de l'état présent qui complète celui qui peut être fait manuellement.

---

<sup>1a</sup> : Protocoles situés dans les annexes.





Vue de la voûte de la Chapelle des Matheron, après assemblage des deux nuages de points obtenus grâce aux relevés laser. Logiciel Cloud Compare

La lasergrammétrie permet, également, de réaliser une restitution numérique en 3 dimensions. Le relevé ne se fait plus avec un appareil photographique, mais avec un laser. Le laser va relever des points dans un système xyz, dans toutes les directions, grâce à des capteurs numériques, qui vont calculer la distance de ce point en fonction de la rapidité du retour du laser, ainsi que la valeur angulaire du point par rapport au laser. Ce relevé est de plus en plus utilisé, car précis et rapide dans son exécution du relevé.

Tout comme pour le relevé photogrammétrique, un protocole de relevé lasergrammétrique a été proposé avant la visite du site. Ce protocole, comme souvent lorsqu'ils sont prévus avant d'avoir pu voir la réalité actuelle du site, a dû être modifié une fois sur place. (protocoles en annexe)

Les éléments étudiés doivent être acquis par plusieurs stations laser pour avoir un relevé plus précis. Pour rassembler ces différentes acquisitions, les relevés sont ouverts dans le logiciel Cloud Compare qui permet de faire cet assemblage.

La lasergrammétrie rend possible la mesure précise de la distance entre deux points, de la dimension d'un élément, de créer des coupes sur l'objet étudié, et donc d'avoir des informations géométriques et morphologiques, mais il ne permet pas comme la photogrammétrique d'avoir des informations colorimétriques.

Grâce au relevé lasergrammétrique, la chapelle des Matheron qui n'est pas éclairée et ne permettait pas le relevé à l'oeil nu, nous a permis de voir la voûte d'ogives ainsi que les nervures moulurées et les culots imperceptibles jusqu'alors. En plus, de nous donner une information géométrique importante pour la reconnaissance d'un style architectural, ce relevé nous permet de mesurer précisément les dimensions des éléments composants les murs, la voûte... Ce relevé nous permet de voir le décor primitif actuel de la chapelle, le plan presque carré de celle-ci, ainsi que ses éléments architecturaux découlant d'un style gothique.

### c. La dendrochronologie : une approche scientifique

Les deux premières approches de datation que nous venons de voir sont des approches dites non-invasives. C'est à dire qu'elles ne nécessitent aucun prélèvement ou enlèvement de matière. Les méthodes d'analyse d'un bâtiment patrimonial sont diverses et peu de celles-ci sont non-invasives. Beaucoup sont, en effet, invasives et nécessitent le prélèvement, le carottage d'éléments constituant l'édifice pour qu'ils soient analysés dans des laboratoires.

La dendrochronologie, du grec ancien dendron, « arbre », khronos, « temps » et logie, « discours », est une science qui permet d'obtenir des informations sur la datation du bois. C'est une méthode de datation absolue, elle permet de donner à l'année près l'âge de l'arbre.

Le bois est un élément de structure utilisé dans les édifices et notamment les églises. Cependant, cette méthode de datation nécessite de trancher, prélever, carotter le bois que le scientifique souhaite analyser.

Lors des recherches historiques menée depuis 2012 par la Direction Archéologie et Muséum de la Ville d'Aix-en-Provence, des études dendrochronologiques et architecturales ont également été effectuées. Les analyses conjointes faites en dendrochronologie et en archéologie permettent de retracer l'histoire de la construction de l'Eglise de la Madeleine.

Les fouilles archéologiques ont été effectuées dans les secteurs du transept, ainsi que les élévations intérieures qui sont devenues accessibles grâce aux travaux de restauration. Les études dendrochronologiques ont été faites sur des bois provenant de la reprise des charpentes des bas-côtés, du plancher situé au-dessus de la chapelle des Matheron, des carottages sur les entrails armés des trois premières travées de la nef, des longrines qui les soutiennent et de la charpente du chevet, ainsi que sur les pannes de la charpente actuelle. Les prélèvements réalisés sur les bois rendus accessibles par le chantier de restauration ont été fait dans un but d'analyses xylologiques et dendrochronologies.

« Ces analyses ont été effectuées en laboratoire. Après préparation des échantillons et détermination des essences utilisées, les cernes ont été mesurés sous loupe binoculaire avec une table de mesure Rinntech pilotée par le logiciel TSAP de Rinntech. Les données (séries de cernes) ont été traitées avec le logiciel Dendron IV (Lambert-CNRS Besançon), les datations dendrochronologiques étant recherchées sur la base des comparaisons avec les référentiels chronologiques régionaux et extra-régionaux. »<sup>25</sup>

Les études archéologiques ont permis de mettre en avant des vestiges anciens retraçant l'histoire de la construction de l'église.

« À l'une ou l'autre de ces églises [première construction ou reconstruction après l'incendie] doivent être attribués plusieurs pans de murs piégés dans les reconstructions du XVIIe siècle et recoupés par les chapelles latérales qui investissent les flancs de la nef à partir du milieu du XIVe siècle. »<sup>26</sup>

Les vestiges épars découverts lors de la fouille archéologique ont une mise en œuvre sensiblement différente, qui mettent en avant les différents temps de leur construction. « La cohérence du plan d'ensemble de l'édifice qu'ils dessinent et, surtout, la forte empreinte qu'ils ont laissée dans l'église actuelle, dont ils façonnent largement les dispositions, invitent cependant à réunir ces maçonneries dans un même état architectural qui pourrait être le résultat d'une exécution conduite sur plusieurs années, selon un programme pré-établi par les Prêcheurs. »<sup>27</sup>

Des fondations ont également été mises à jours. « Cette fondation grossièrement appareillée porte une élévation de moins d'1 m d'épaisseur, aux parements plus soignés, montés de moellons équarris, alignés en assises réglées et liés au mortier de chaux. »<sup>28</sup>

---

<sup>25</sup> : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en-Provence, France. pp.151-170. hal-02143984 , page 3

<sup>26</sup> : Idem, page 8

<sup>27</sup> : Idem, page 8-9

<sup>28</sup> : Idem, page 9



---

Photographie de la voûte de la chapelle des Matheron (cl. G. Thomann)

Source : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en- Provence, France. pp.151-170. hal-02143984 , page 15

Des traces d'enduits sur les parois intérieures ont montré un traitement particulier. Un autre segment de murs gouttereau a été révélé dans les combles. « À cette construction soignée, appareillée de moellons, est lié l'encadrement harpé en pierre de taille d'une fenêtre haute en plein-cintre, extradossée et fortement ébrasée. Occultée vers la fin du XVe siècle par la première chapelle latérale sud dite « chapelle du roi » »<sup>29</sup>.

L'étude dendrochronologique a porté sur les bois mis en œuvre à différentes époques, ces bois illustrent une pratique ancienne très développée. Les pièces étudiées sont toutes en sapin.

Lors de la datation des bois prélevés, il est apparu qu'aucun ne provient de la première construction de l'église du XIIIe siècle, ce qui pourrait être expliqué par l'incendie de 1383, dont font part les écrits.

Des éléments de bois analysés ont mis en avant les traces de réemplois dans l'église, qui n'était auparavant que des suppositions. « Les analyses dendrochronologiques ont livré un dernier lot comprenant quatre solives de sapin, prélevées sur le plancher établi, après le début du XVIIIe siècle, dans la chapelle des Matheron, pour donner un accès dans-œuvre à la tribune d'orgue. Leurs derniers cernes mesurés sont datés entre 1484 et 1497. »<sup>30</sup>

Lors de l'analyse des charpentes, l'hypothèse d'une organisation de chantier a pu être mise en avant. « Hasard de la conservation ou réalité de mise en œuvre, cette distribution des bois est peut-être le reflet d'une organisation de chantier assez fréquente depuis le Moyen Âge, qui s'engage par le chevet pour progresser d'est en ouest afin de permettre une mise en service rapide du chœur des religieux avant même l'achèvement des travaux. »<sup>31</sup>

Lors des fouilles archéologiques qui avaient commencé avant les études dendrochronologiques, de nombreuses questions, concernant les charpentes et les maçonneries qui leurs étaient associés, ne trouvaient pas de réponse. L'analyse dendrochronologique a permis de documenter le chantier quant à la diversité des dates et des conditions de mise en œuvre des bois, mais surtout de donner des réponses chronologiques aux questionnements des archéologues.

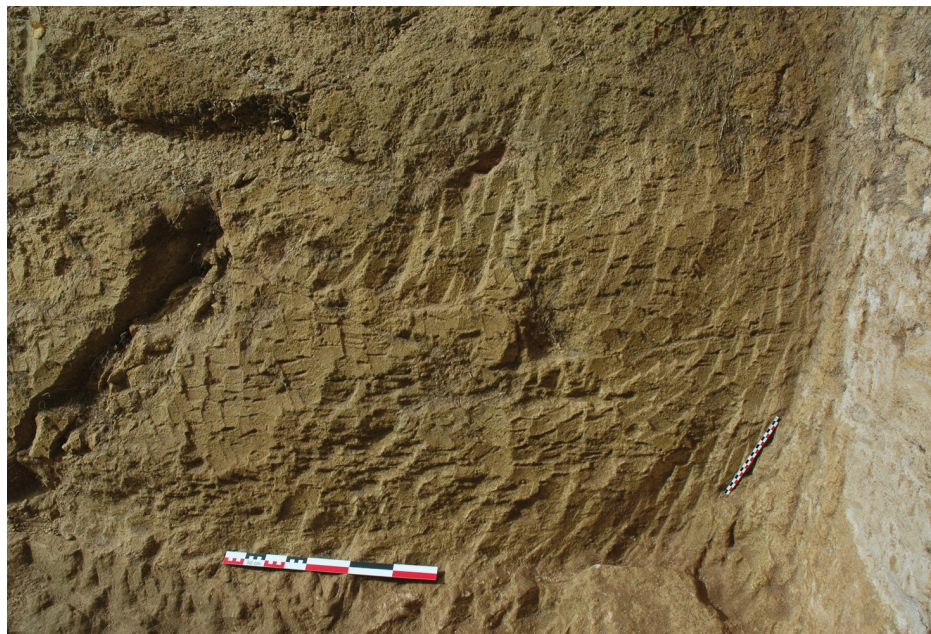
---

<sup>29</sup> : Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en-Provence, France. pp.151-170. hal-02143984, page 10

<sup>30</sup> : Idem, page 16-17

<sup>31</sup> : Idem, page 19





Photographie de la paroi calcaire occidentale du tronc central du fossé, de l'éperon barré du Camp de César de Nucourt

Source : Céline Blondeau, *Une approche nouvelle des modes d'extraction et des traces d'outil*, Archéologie médiévale [En ligne], 40 | 2010, mis en ligne le 07 septembre 2018. URL : <http://journals.openedition.org/archeomed/13428>

## d. Les traces d'outils : une approche visuelle et scientifique

Les méthodes et techniques de construction du bâti font tout autant partis de notre patrimoine. Dans la pratique de l'architecte, comprendre ces méthodes de constructions, les outils utiles à ces mises en œuvre et au travail des matériaux, est nécessaire. Pour pouvoir travailler sur l'existant, mais aussi pour les réutiliser dans nos pratiques actuelles.

Le travail sur la pierre laisse de nombreuses traces. Tout d'abord, ces traces sont visibles dans les carrières dans lesquelles les traces d'extractions ne sont pas effacées par les carriers. Nous pouvons également trouver des traces d'outils sur les blocs de pierres mis en œuvre dans les édifices. Ces traces sont multiples : finitions (brossée, sablée, bouchardée,...), marquage des carriers, marquages sur le chantier,...

Dans le travail de Céline Blondeau <sup>32</sup> l'analyse des traces d'outils dans les carrières ont mis en avant l'utilisation d'un outil que l'on ne pensait pas utilisé pour l'extraction. Ce qui remet en question et ouvre un nouveau point de vu quant à l'extraction à cette période. Mais qui pourrait également être une remise en question générale des savoirs autour des savoir-faire ancestraux.

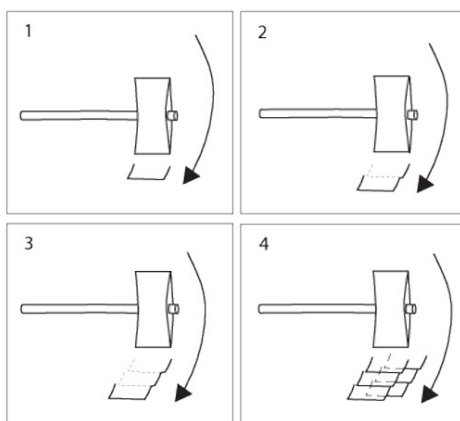
Les recherches de Céline Blondeau se font sur la fouille de l'éperon barré du Camp de César de Nucourt, et a permis d'examiner et de mettre en avant les phases d'extractions de la pierre et de l'usage sur le mur de rempart situé sur le site. Le rempart est daté de la fin du Ve siècle avant notre ère. Après le nettoyage du site, trois phases d'extractions sont reconnaissables.

L'état de conservation de la carrière permet de reconnaître de nombreuses traces d'outil dans la pierre. Dans son étude Céline Blondeau met en place un protocole de recherche particulier : « Les empreintes d'outil reconnues en carrière ont été confrontées à celles laissées lors de l'expérimentation pratiquée parallèlement, avec différents outils d'extraction et de taille de la pierre, sur le même matériau calcaire. »<sup>33</sup>

---

<sup>32</sup> : Céline Blondeau, *Une approche nouvelle des modes d'extraction et des traces d'outil*, Archéologie médiévale [En ligne], 40 | 2010, mis en ligne le 07 septembre 2018. URL : <http://journals.openedition.org/archeomed/13428>

<sup>33</sup>: Idem



"À gauche, expérimentation de la taille au marteau taillant (par Maxence Pieters, doctorant / cl. C. Blondeau). À droite, schéma de la disposition des traces successives de marteau taillant démontrant une pratique de la taille de haut en bas et en reculant (dessin C. Blondeau)."

Source : Céline Blondeau, *Une approche nouvelle des modes d'extraction et des traces d'outil*, *Archéologie médiévale* [En ligne], 40 | 2010, mis en ligne le 07 septembre 2018. URL : <http://journals.openedition.org/archeomed/13428>

La mise en avant d'une méthode d'extraction est permise par ces traces d'outil, amenant à un code de lecture qui pourrait être mis en place dans d'autres carrières. « Le dialogue entre l'observation de terrain et l'archéologie expérimentale se proposait d'identifier les outils et les gestes techniques des carriers du premier Moyen Âge. »<sup>34</sup>

Sur le site archéologique de cette carrière à ciel ouvert, sont encore présents des « palliers détourné par des tranchées, pallier débité, blocs en cours d'extraction, blocs extraits et enfin blocs extraits et relevés, prêts à être sortis de la carrière. »<sup>35</sup>

Les traces d'outils encore présentes se situent principalement sur les parois et les tranchées verticales. Les « technique de relevé permettant d'effectuer un enregistrement aussi exhaustif que possible et d'une grande fiabilité a été mis en place. »<sup>36</sup>

Tout d'abord, les empreintes ont été relevé à l'échelle 1 par contact avec la paroi sur un film transparent. Un carottage a aussi été effectué. Les pans de la carrière ont été photographié et numérisé. Ces différents relevés ont été recalés, remontés entre eux pour être redessinés sur des logiciels.

Une fois ces relevés effectués, il a été remarqué que sur l'ensemble de la carrière les traces présentes étaient similaires, avec une forme de méplat quadrangulaire organisé en arc de cercle.

Puis les chercheurs ont posé des hypothèses sur la provenance de ces marques. La courbe serait due à la rotation de l'avant-bras, en utilisant un outil emmanché à lame plate. Ces premières constatations faites, les chercheurs ont recensé les outils pouvant créer ces marques, et les hypothèses se sont tournées sur le marteau taillant et la polka.

Après l'analyse de l'utilisation de ces outils, leur disposition et leur forme, c'est le marteau taillant qui créerait précisément ces traces. Pour valider cette hypothèse, les chercheurs ont travaillé la pierre du site avec un marteau taillant. De plus, d'après les traces laissés et l'outil utilisé, ils ont pu mettre en avant l'organisation du chantier dans la carrière lors de son fonctionnement.

---

<sup>34</sup> : Céline Blondeau, *Une approche nouvelle des modes d'extraction et des traces d'outil*, Archéologie médiévale [En ligne], 40 | 2010, mis en ligne le 07 septembre 2018. URL : <http://journals.openedition.org/archeomed/13428>

<sup>35</sup> : Idem

<sup>36</sup> : Idem



Visage d'homme à moustache sur un front du secteur 7 de la carrière de Baou Tailla et Marque HN incisée sur un bloc dans la carrière de Verdon 2.

Source : Cécilia Pédini, *Les Carrières de la Couronne de l'Antiquité à l'époque contemporaine*, 2013, pages 35 et 44



Cette étude a permis de mettre en avant pour la première fois l'utilisation du marteau taillant dans les carrières de pierre. L'identification des méthodes utilisées a été permise par le relevé à l'échelle 1.

« La méthode d'approche des traces d'outils ainsi employée à Nucourt ouvre ainsi de nouvelles perspectives pour l'élargissement de nos connaissances sur les systèmes et techniques d'extraction du premier Moyen Âge. Elle apparaît aussi par sa finesse d'observation utilisable comme élément traceur chronologique lors d'une fouille complexe où les liaisons stratigraphiques ne sont pas toujours réalisables. »<sup>37</sup>

Si cette recherche a mis en avant l'utilisation du marteau taillant pour l'extraction au Moyen Âge, l'étude des traces d'outils ne s'arrête pas à celles que l'on trouve dans les carrières. Les traces d'outils sont, également, visibles sur les blocs de pierre des bâtiments construits. Ces traces peuvent résulter des finitions, de la sculpture, mais aussi du marquage des blocs pour leur traçabilité ou leur mise en œuvre.

Ces marquages faits par les carriers ou les tailleurs de pierre sont difficilement visibles quand les pierres sont assemblées pour former l'édifice. Cependant, la présence de ces marques est prouvée par l'analyse d'anciennes carrières où les chercheurs ont retrouvé des blocs prêts à être envoyés sur les chantiers.

Cécilia Pédini <sup>38</sup> a réalisé un important travail sur les carrières de la Couronne en relation avec le Projet Collectif de Recherche sur la pierre de construction utilisée à Marseille entre l'Antiquité et le XIX<sup>e</sup> siècle, et a notamment mis en avant l'existence de ces marquages.

Après la taille préparatoire les blocs sont marqués pour être expédiés. A cette période le marquage permet une identification d'où est extraite la pierre, c'est à dire de quelle carrière, et permet d'identifier l'ouvrier qui l'a extraite. Puisque tous les blocs étaient envoyés dans un même bateau, et non dans des bateaux séparés, ce marquage était nécessaire pour s'avoir d'où venait chaque bloc de pierre.

---

<sup>37</sup> : Céline Blondeau, *Une approche nouvelle des modes d'extraction et des traces d'outil*, Archéologie médiévale [En ligne], 40 | 2010, mis en ligne le 07 septembre 2018. URL : <http://journals.openedition.org/archeomed/13428>

<sup>38</sup> : Cécilia Pédini, *Les Carrières de la Couronne de l'Antiquité à l'époque contemporaine*, 2013



## Les traces d'outils – taille de finition

N 210



Trois bretures différentes,  
avec des dents de 3, 4 et 5 mm  
Taille oblique, en gerbe, chevron, croisée,  
désordonnée

N 326



Face extradossée : bretteuse, marteau taillant droit  
ou polka  
Taille oblique, chevron, croisée, désordonnée

N 1a



Éléments sculptés à la gradine et bretteuse  
fine utilisée perpendiculairement  
Taille parallèle

Les traces d'outils découvertes sur les pierres de Notre-Dame de Paris

Source : GALLET Yves, ALBRECHT Stephan, LEROUX Lise, MOULIS Cédric, YBERT Arnaud, WARME Nicolas, Groupe travail « pierre », dans : Chantier scientifique Notre-Dame – état des lieux et perspectives, [Colloque tenu à l'Institut National du Patrimoine, 2, rue Vivienne à Paris, les 19 et 20 Octobre 2020], [en ligne] Disponible sur : [https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir\\_videos](https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir_videos)

« Les carriers, que ce soit dans l'Antiquité, au Moyen Âge ou à l'époque moderne, apposent donc des marques sur les blocs qu'ils extraient, pour que l'on puisse identifier la provenance du matériau. Cette marque a une grande importance économique et commerciale, puisqu'elle permet à la fois d'évaluer la quantité de matériaux produite, de porter réclamation en cas de défaut ou de non-conformité de la pierre, mais facilite aussi le suivi sur la totalité de la chaîne opératoire de la construction. »<sup>39</sup>

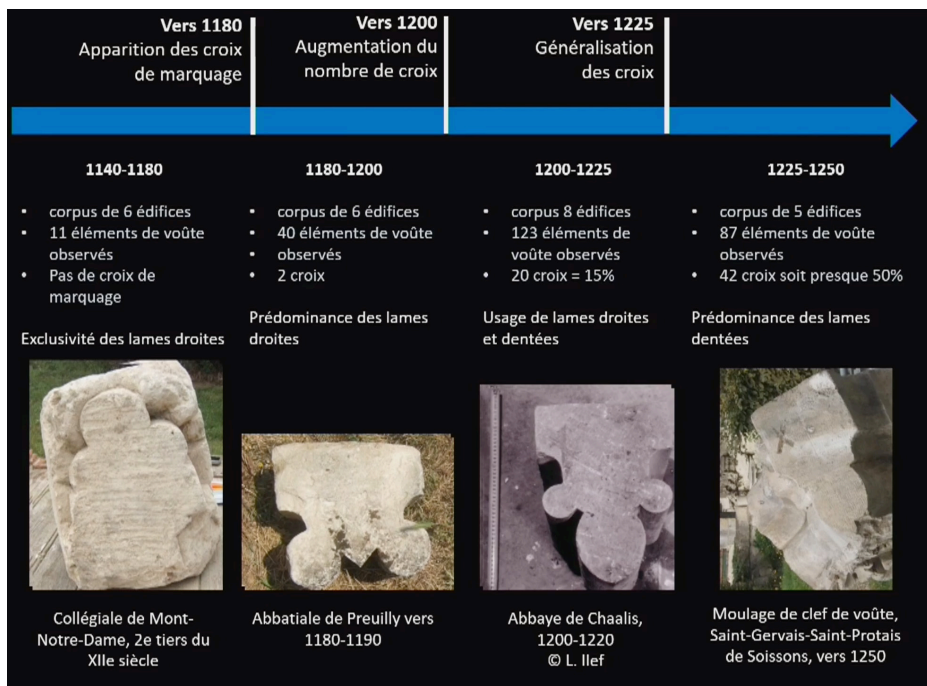
Ces marques présentent sur les blocs pour donner des indications ont aussi été récemment mises à jour dans le chantier de restauration de Notre Dame de Paris. Plusieurs groupes de travaux ont été créés pour étudier les vestiges après l'incendie. Un groupe s'est constitué autour de l'analyse de la pierre. Ce groupe s'intéresse à l'étude des claveaux de l'arc doubleau de la nef effondrée lors de l'incendie.

Ils ont pu, tout d'abord, relever des traces d'outils sur ces claveaux. Des traces de brettures de trois tailles différentes : 3, 4, 5mm, qui forment des traces obliques, en gerbe, en chevron ou croisée. Sur les faces extradossées, ils ont pu relever des traces de brettures, de nouveau, ainsi, que des traces de marteau taillant ou de polka. Ces deux premières faces sont noyées dans la maçonnerie ou cachées et elles sont donc peu ordonnées, avec un travail moins fin que pour les faces visibles. Sur les parties visibles des claveaux, les éléments sculptés portent des traces de gradine et de bretture utilisées perpendiculairement. Ces traces correspondent au travail de finition des pierres.

Sur certains claveaux, des encoches ont été faites de profondeur variable, une fois que l'arche était en tension. L'idée est de restituer l'arc et de le remonter à blanc, mais les chercheurs ont peu de données pour savoir comment replacer les pierres entre elles. Les encoches permettent de recaler des pierres ensemble, par deux ou trois. Mais il est nécessaire d'avoir d'autres éléments pour restituer l'arc, et pour cela il faut faire un travail avec d'autres groupes intervenant sur le chantier. La reconstitution permettrait de valider les hypothèses de l'existence de croix trouvées sur les claveaux.

---

<sup>39</sup> : Cécilia Pédini, *Les Carrières de la Couronne de l'Antiquité à l'époque contemporaine*, 2013, page 118



#### Chronologie de l'utilisation des croix de marquage

Source : GALLET Yves, ALBRECHT Stephan, LEROUX Lise, MOULIS Cédric, YBERT Arnaud, WARME Nicolas, Groupe travail « pierre », dans : Chantier scientifique Notre-Dame – état des lieux et perspectives, [Colloque tenu à l'Institut National du Patrimoine, 2, rue Vivienne à Paris, les 19 et 20 Octobre 2020], [en ligne] Disponible sur : [https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir\\_videos](https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir_videos)

Sur l'une des faces de pose, ils ont pu repérer des croix, plus précisément quatre types de croix. Ces croix ont pu être réalisées avec une brette, une broche, un ciseau ou avec une pointe sèche.

La première question est celle de la fonction de ces croix, fréquentes sur les voûtes d'ogives dans le corpus de base comportant d'autres églises. Il y a différentes possibilités de la signification de ces croix, sans que l'une soit plus probable que l'une autre. Mais elles sont riches d'informations, en les classant dans un corpus d'éléments similaires. Ces éléments laissent entendre que les voûtes de la nef ont pu être réalisées entre 1140 et 1180, plus probablement entre 1180 et 1200, possiblement entre 1200 et 1225, mais surtout très probablement après 1225. Cette supposition est similaire à celle faite à partir des encoches.

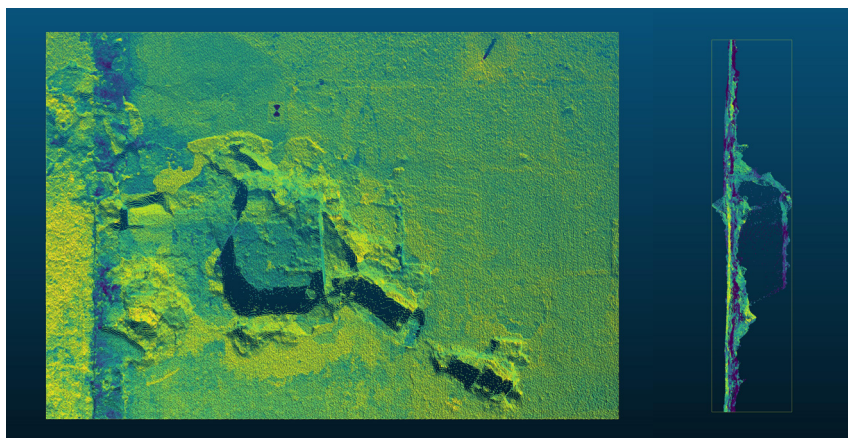
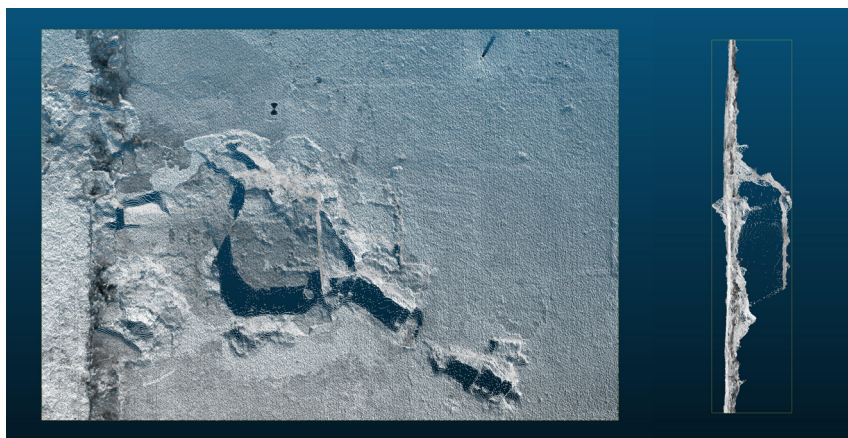
Cette présence systématique de croix de marquage et la présence des encoches permettent de classer la construction de l'arche dans une chronologie de l'histoire de l'architecture et de la construction. Ces éléments, même s'ils n'ont pas une signification précise, sont riches d'informations et peuvent permettre de dater la construction d'un édifice ou d'une partie de l'édifice.

Dans notre étude de cas sur l'Eglise de la Madeleine, il est apparu important de différencier l'altération de la trace de l'outil, pour permettre d'aboutir à des techniques de restauration adaptée qui n'effacent pas les traces d'outils, si elles sont présentes dans l'édifice.

Pour cela un protocole a été mis en place pour la chapelle des Matheron avant la visite de site. Tout d'abord, il était prévu un relevé à la main avec des restitutions (croquis et plans) des façades, du sol et de la voûte. Ce relevé devait être annoté en fonction des éléments qu'il semble important de préciser.

Ce premier relevé à l'œil nu devait être accompagné d'un tableau relevant les altérations et traces d'outils visibles, qu'elles soient définies précisément ou qu'elles soient des hypothèses du types d'altérations ou de la trace d'un outil. Ce tableau permet de déterminer précisément où se situent ces éléments visibles à l'œil nu dans la chapelle et de les définir avec un vocabulaire précis.

A la suite de ces relevés à l'œil nu, comme expliqué précédemment un relevé lasergrammétrique et photogrammétrique a été proposé.



Extrait du nuage de point de la voûte de la Chapelle des Mathérons.  
Vue en facade et en coupe de ce qui semble être une altération.

Nous avons pu le voir, ce protocole prévu avant la visite de site n'a pas pu être fait puisque la chapelle n'était pas éclairée. Ce qui a fait que seul le relevé laser a pu être effectué.

Ce relevé lasergrammétrique, une fois traité sur Cloud Compare a pu nous donner un nuage de points de la chapelle. De ce nuage de points, des élévations ont pu être tirées. Sur ces élévations, les appareillages de pierre, ainsi que des éléments ressemblant à des altérations ont pu être relevés. La lasergrammétrie nous a permis de relever la géométrie de ces éléments. Le laser lors de son relevé ne prend pas la couleur des points, ce qui enlève une information importante pour distinguer différents types d'altérations ou traces d'outils.

Cette colorimétrie du nuage de points aurait pu être donnée grâce à la photogrammétrie et à l'assemblage des deux nuages réalisés à partir de ces deux relevés.

Seulement, ces deux techniques de relevé ne permettent de voir que le visible et d'avoir des informations sur l'ensemble de la chapelle sans avoir une précision très fine. Il aurait été intéressant d'intégrer des analyses sur des zones spécifiques grâce à d'autres techniques et méthodes de relevés, tels que l'imagerie scientifique ou la RTI.

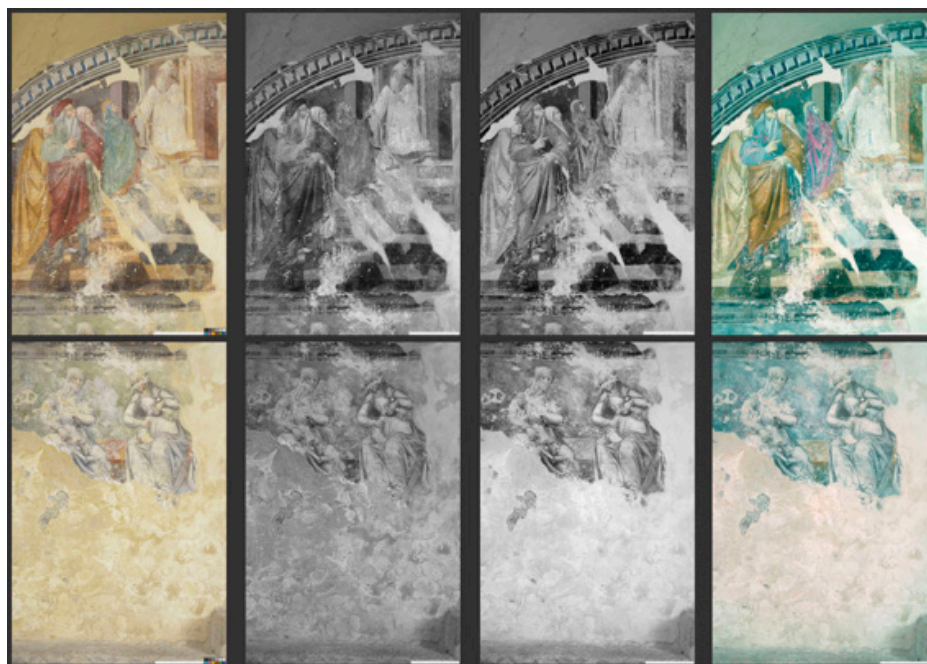
L'imagerie documentaire et scientifique permet d'acquérir des données sur les matériaux, la technique originale, les altérations, les dégradations, l'environnement, ..., c'est une méthode d'analyse non-destructive.

« L'accès à l'invisible, l'identification visuelle, l'apport documentaire ont fait de l'imagerie scientifique (dite aussi imagerie technique, technical imaging) un outil majeur dans l'apport des sciences à la conservation-restauration dans la première moitié du XXe siècle. Outil de connaissance et traceur de l'histoire matérielle, elle a modifié considérablement les conditions d'intervention sur les œuvres en apportant une aide précieuse lors des différentes étapes d'un projet de restauration. »<sup>40</sup>

---

<sup>40</sup> : Roland May, Odile Guillon, Anthony Pamart et Jean-Marc Vallet, *Imagerie numérique et conservation-restauration : état de l'art et perspectives*, In Situ [En ligne], 39 | 2019, mis en ligne le 31 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/insitu/21940> ; DOI : 10.4000/insitu.21940, page 1





Création d'images composites

Source : GUILLON Odile, *La documentation par l'image observer, analyser, documenter*, CICRP, page 30

Pendant les 30 dernières années, l'imagerie scientifique a connu de nombreux changements et évolutions, qui en association avec l'essor des techniques de numérisation, ont permis de « nouvelles techniques d'analyse pour la conservation préventive, curative et la restauration du patrimoine culturel ».<sup>41</sup>

Elle intervient dans le domaine du visible avec des photographies en lumière blanche ou directe, des photographies en lumière rasante ou semi-rasante, et des photographies sous un éclairage ultraviolet. Mais l'imagerie scientifique peut constituer en des images dans le domaine de l'invisible avec des photographies en infrarouge ou encore la radiographie.

Cette technique est très utilisée dans l'analyse des peintures murales. Elle nécessite un matériel précis : un boîtier photographique, un ordinateur ou tablette, des flashes électroniques, des rampes de néons et une charte de couleur.

Tout comme nous avons pu le voir avec le protocole proposé avant la visite de l'Eglise de la Madeleine, il faut faire évoluer l'installation du matériel en fonction de la mission, de l'espace ...

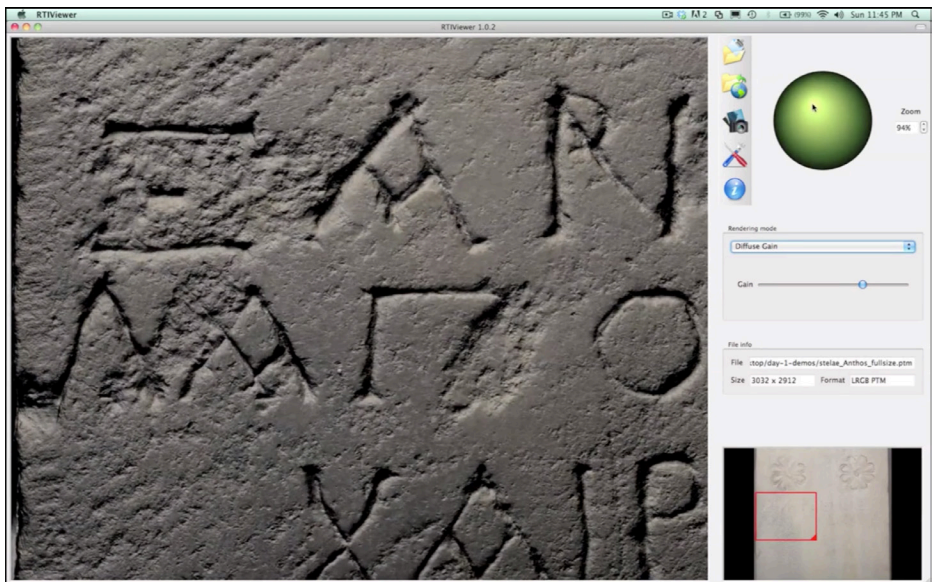
Après le relevé dans le processus de création d'image, l'étape qui suit est celle du traitement. Le numérique contrairement à l'analogique permet de modifier facilement l'image brute pour faire apparaître une information latente, invisible à l'œil nu. « L'image devient aussi un support d'investigation ».<sup>42</sup>

L'imagerie documentaire et scientifique permet notamment de superposer différentes images.

---

<sup>41</sup> : Roland May, Odile Guillon, Anthony Pamart et Jean-Marc Vallet, *Imagerie numérique et conservation-restauration : état de l'art et perspectives*, In Situ [En ligne], 39 | 2019, mis en ligne le 31 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/insitu/21940> ; DOI : 10.4000/insitu.21940, page 1

<sup>42</sup> : Idem, page 5



Exemple de RTI : *Marble Stele*, Inscribed and recarved marble stele from the Tauric Preserve of Chersonesos, Ukraine. Imaged in July 2008.

Source : Cultural Heritage Imaging, *Reflectance Transformation Imaging (RTI)*, [en ligne] Lecture Novembre 2020, Disponible sur : <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/>

La RTI ou Reflectance Transformation Imaging est une technologie développée au début des années 2000 par le Cultural Heritage Imaging. C'est une méthode de photographie qui capte la forme et la couleur de la surface de l'élément étudié.

La RTI est une méthode avec un protocole particulier, les photographies numériques sont prises d'un point fixe. La lumière est, ensuite, projetée depuis plusieurs directions, ce qui produit une série de photographie d'un objet depuis un point de vue unique avec des changements d'ombre et de reflets. Ces informations d'éclairage sont intégrées dans un logiciel qui reproduira l'objet étudié en générant un modèle mathématique de sa surface. La RTI permet ensuite de reproduire l'impact de la lumière sur cette surface depuis différentes sources et donc d'analyser cette surface. Avec la reflectance transformation imaging, l'objet n'est pas modélisé, mais on cible la surface de l'objet, sur laquelle les jeux d'ombre font apparaître d'infimes reliefs.

Cette méthode contrairement à la photogrammétrie acquière les vraies couleurs de l'objet étudié et non des couleurs qui changent en fonction de la luminosité extérieure. La RTI est complémentaire de la photogrammétrie. La photogrammétrie va produire des documentations générales quand la RTI va faire apparaître les détails d'une partie de l'édifice étudié (la RTI est limitée à des surfaces de 2m2).

Ces méthodes aurait pu nous permettre de dater l'édifice en comparant les traces résultant d'une méthode de construction avec un corpus de bâtiment équivalent. Nous avons pu le voir, l'analyse des traces d'outils amène à une connaissance nouvelle dans certains cas de techniques d'extractions ou de construction. Elle donne également la possibilité de valider ou d'invalider des hypothèses de techniques et d'outillages constructifs utilisé à une certaine époque.





### **III. Importance et impact du partage d'information dans la création d'une connaissance**

---





Nous venons de voir différentes méthodes de datations, mais comme nous l'avons évoqué, dans de nombreux cas, il est important de confronter les recherches et les analyses de chaque spécialiste. Le croisement des informations est important, car chaque scientifique et professionnel va regarder et analyser des éléments en particulier. De plus, même si ces scientifiques n'analysent pas les mêmes éléments, ils peuvent utiliser des outils numériques communs.

Tout d'abord il faut discerner l'information de la connaissance. L'information est définie par le CNRTL comme l'« action d'une ou plusieurs personnes qui font savoir quelque chose, qui renseignent sur quelqu'un, sur quelque chose. »<sup>43</sup>. La connaissance elle correspond à l'« acte de la pensée qui saisit un objet par les sens ou non avec implication plus ou moins grande du sujet de la connaissance. [...] Action ou acte de se faire une représentation, de s'informer ou d'être informé de l'existence de quelque chose; l'idée ainsi formée. »<sup>44</sup> L'information nécessite l'action d'une personne, mais surtout c'est l'association des savoirs de chacun qui va permettre d'acquérir de la connaissance sur l'objet étudié.

Dans le cas de l'Eglise de la Madeleine, l'association des études archéologiques, documentaires et dendrochronologiques ont permis d'aboutir à un phasage dans la construction de l'édifice. « L'un des principaux apports de l'exploitation conjointe des différentes sources documentaires a été de restituer la complexité architecturale de cet édifice largement restauré à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle et d'en proposer un phasage. »<sup>45</sup>

---

<sup>43</sup>: Définition du CNRTL. Disponible sur : <https://www.cnrtl.fr/definition/information>

<sup>44</sup>: Définition du CNRTL. Disponible sur : <https://www.cnrtl.fr/definition/connaissance>

<sup>45</sup>: Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en- Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques* (La Madeleine, Aix-en-Provence). ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en- Provence, France. pp.151-170. hal-02143984 , page 2

Ces questionnements de croisement des informations sont très visibles actuellement dans le chantier de Notre-Dame de Paris. Cette problématique du partage et du croisement des informations a notamment donné lieu à un colloque, dans lequel Stephane Deschamps, mais aussi beaucoup d'autres, rappellent l'importance de la complémentarité des savoirs, en se questionnant sur « Comment on peut apporter nos regard et travailler ensemble dans une même dynamique. »<sup>46</sup>

Lors de l'ouverture du chantier de restauration de Notre-Dame de Paris, après l'incendie survenu en 2019, de nombreux scientifiques ont été appelés pour collecter les gravats et tirer des informations sur l'histoire de l'édifice depuis ces vestiges et pour acquérir, ainsi, des connaissances nécessaires à la restauration.

Du fait de l'importance de ce chantier, de nombreuses disciplines scientifiques interviennent . Des groupes de recherches ont été formés afin pour qu'ils travaillent ensemble, par plus petit groupe. Cependant, il a fallu réfléchir à un moyen de partager les données, de les collecter et que chacun puisse renseigner les analyses qu'il a faite. Pour répondre à cet enjeu, un groupe a été formé : le groupe « Données numériques ».

Ce groupe de travail est formé par des chercheurs venant de 12 unités de recherches différentes et de diverses disciplines : ingénierie, architecture, archéologie, histoire... Les thématiques de recherche et de compétence de ce groupe sont multiples, et concernent la métrologie, l'analyse et la reconstruction, les systèmes d'informations, et la restitution.

Les équipements à leur disposition sont variés : lasergrammétrie, photogrammétrie, imagerie scientifique, drones, robots... ainsi que les logiciels de recherche associés à ces techniques.

---

<sup>46</sup> : Stephane Deschamps, *Des gravats aux vestiges : retour sur un protocole expérimental et des collaborations inédites*, dans : Chantier scientifique Notre-Dame – état des lieux et perspectives, [Colloque tenu à l'Institut National du Patrimoine, 2, rue Vivienne à Paris, les 19 et 20 Octobre 2020], [en ligne] Disponible sur : [https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir\\_videos](https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir_videos)

L'objectif est de créer un écosystème numérique pour documenter dans l'espace et dans le temps le chantier de restauration. Le chantier de Notre-Dame apparaît comme une opportunité car il est une aventure pluridisciplinaire, qui va produire un échantillon emblématique de la production de données relevant des sciences du patrimoine.

Cet écosystème numérique est avant tout quelque chose qui doit répondre aux enjeux du chantier. Tout d'abord, il se doit d'être une plateforme pour centraliser les données et avoir une production collaborative de connaissance. Il doit aussi être un système d'information pour analyser et mémoriser, dans l'espace et dans le temps, les activités scientifiques menées, et pour finir, il doit constituer en une interface entre le chantier scientifique et le chantier de restauration.

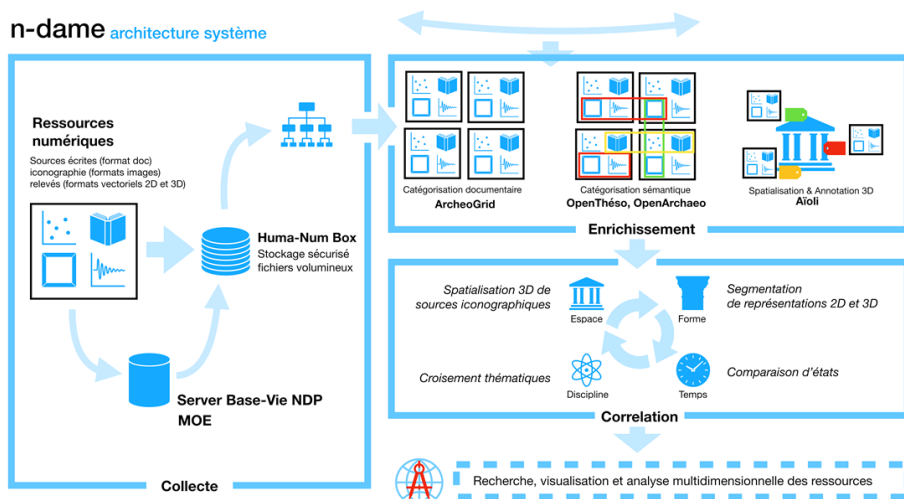
L'enjeu est collectif et inclus tous les groupes de travail : pour développer les instruments de recherche ad hoc (collecte, traitement, catégorisation et corrélation), définir collectivement les approches méthodologiques pour produire des données sémantiquement enrichies. Cela nécessite une confrontation des modes opératoires des groupes de travail et une réflexion continue sur le cycle de vie des données. Ceci dans le but de créer « des données qui soient capables de véhiculer des sens, la richesse, des interprétations que la diversité des regards portés sur l'objet constitue. »<sup>47</sup>

Dans cette recherche, l'un des aspects important est la pérennité de ces données. Pour cela il faut que les données puissent être lisibles par chacun, sur une plateforme mutualisée et accessible, que le stockage de ces données soit sécurisé et qu'elles soient stockées sur le long terme. Mais surtout, il importe que ces données soient référencées sur les moteurs de recherche et basées sur les standards de documentation.

---

<sup>47</sup> : Livio De Luca, *Groupe travail « données numériques »*, dans : Chantier scientifique Notre-Dame – état des lieux et perspectives, [Colloque tenu à l'Institut National du Patrimoine, 2, rue Vivienne à Paris, les 19 et 20 Octobre 2020], [en ligne] Disponible sur : [https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir\\_videos](https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir_videos)

## n-dame architecture système



### Architecture système de la plateforme de centralisation n-dame

Source : Chantier scientifique pour la restauration de Notre-Dame de Paris, Groupe de Travail « Données Numériques ». Disponible sur : <https://www.notre-dame.science/index.php/plateforme-de-centralisation-des-donnees/>

L'écosystème numérique sur lequel le groupe de travail réfléchi se base sur des travaux de recherche et sur des outils de laboratoire qui sont mis à leur disposition. Cet écosystème comprend plusieurs volets. Tout d'abord, un volet de collecte des données, avec une centralisation des différentes données, dont un relevé 3D de Andrew Tallon en 2010, qui est devenu le référentiel topographique de l'ensemble ces données.

L'écosystème comprend également un volet de production de données, avec une réflexion continue sur les modalités de relevé en lien avec les besoins. C'est un travail de fusion des données notamment 3D.

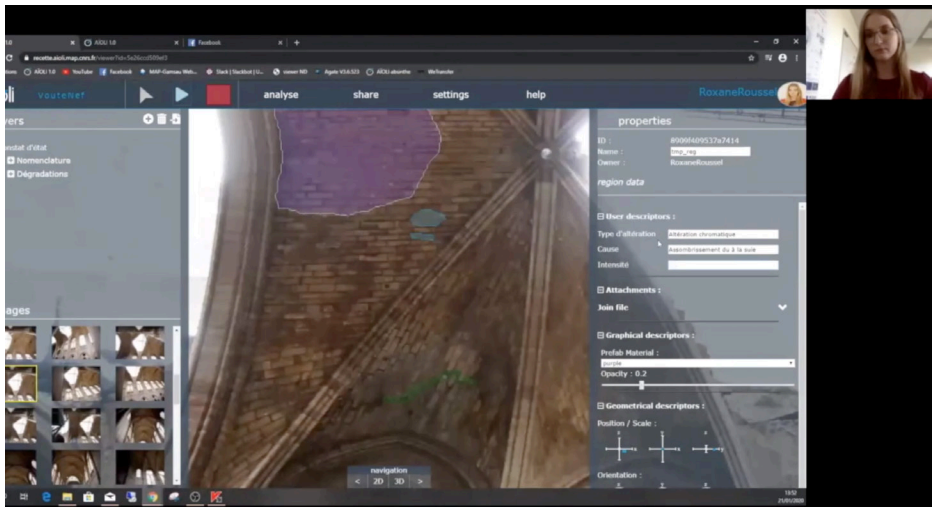
L'enrichissement sémantique est l'un des éléments les plus important de la recherche. Il se divise en plusieurs volets : la catégorisation documentaire, la catégorisation sémantique, la spatialisation et l'annotation 3D. Cet enrichissement sémantique se base notamment sur un vocabulaire contrôlé, utilisé par les différents domaines mobilisé dans l'observation et l'analyse.

L'un des enjeux principaux de la recherche est la spatialisation 3D des ressources 3D et des ressources non 3D et de les faire dialoguer.

L'utilisation du logiciel Aioli développé au MAP a été choisi pour être testé et développé. Il permet la spatialisation en 3 dimensions, à partir de photographies, avec la possibilité d'ajouter des calques d'informations et d'annotation 2D et 3D... en utilisant un vocabulaire contrôlé. C'est une plateforme collaborative.

Lors de la conception d'Aioli, les chercheurs ont voulu faciliter le dialogue entre les scientifiques et ont trouvé comme seul dénominateur commun à la recherche de ces scientifiques l'objet patrimonial. C'est ce qui explique la place centrale de l'édifice étudié qui connecte toutes les informations entre elles. En permettant l'accès à cette plateforme sur le web, les scientifiques peuvent y accéder depuis leurs ordinateurs dans n'importe quel lieu (sur le site d'étude, dans leurs bureaux...).





Visualisation de la plateforme Aïoli

Source : Roxane Roussel (MAP) - *Premières applications expérimentales d'Aïoli pour le chantier scientifique*, Disponible sur : <https://www.notre-dame.science/index.php/donnees-numeriques/>

L'annotation se fait directement en dessinant sur une image, et se reporte automatiquement sur toute les images ainsi que sur l'objet 3D. Les données géométriques sont applicables sur l'objet 3D et sur les photographies, qu'elles soient sur l'ensemble de l'objet ou sur des parties spécifiques. Mais ces données géométriques sont quantitatives, la question se pose pour les données qualitatives obtenues par l'observation des scientifiques. Ces annotations peuvent être enregistrées sous des calques dans lesquels des onglets de qualifications peuvent être intégrer et comporter des fichiers joints.

La version Aioli actuelle est une version Bêta, les scientifiques testent la plateforme pour voir ses limites, et comment il serait possible de l'améliorer.

Les scientifiques utilisent dans le cas du chantier de Notre-Dame de Paris des logiciels déjà créé, qu'ils font évoluer, mais ce projet ouvre sur des enjeux qui nécessitent de faire face à la masse des données. « Mais surtout l'enjeu, qui est un enjeu à long terme [...] consiste à mettre en place un moteur de corrélation automatique de ces données. »<sup>48</sup>

Ce moteur doit pouvoir intégrer des données de différents aspects d'espace, de temps, de forme et de domaines de connaissances, pour être capable par l'association de ces quatre dimensions d'analyser et d'enregistrer la pluralité des regards portés sur le patrimoine.

---

<sup>48</sup> : Livio De Luca, *Groupe travail « données numériques »*, dans : Chantier scientifique Notre-Dame – état des lieux et perspectives, [Colloque tenu à l'Institut National du Patrimoine, 2, rue Vivienne à Paris, les 19 et 20 Octobre 2020], [en ligne] Disponible sur : [https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir\\_videos](https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir_videos)

Nous avons pu au cours de cette recherche acquérir des connaissances quant au travail autour de la pierre, mais aussi sur les analyses et recherches autour du patrimoine.

Tout d'abord, nous avons pu approcher la pierre à son état de matière avec la géologie. La connaissance de la géologie, ainsi que celle des caractéristiques de la roche, amènent des méthodes d'extractions particulières. Ces méthodes d'extractions ont évolué, notamment, grâce aux outils qui ont, eux aussi, évolué en fonction des découvertes technologiques et techniques provenant de toutes disciplines.

Ces connaissances autour de la pierre sont importantes dans l'étude du patrimoine et notamment dans sa datation. Comme nous avons pu le voir la datation d'un édifice peut se faire de plusieurs manières et impliquer des disciplines différentes. Les traces d'outils doivent être différenciées des altérations, c'est dans ce but qu'a été proposé un protocole, qui malheureusement n'a pas été mis en place. Cependant ce protocole se veut ouvert à l'utilisation de différents outils. Il est prévu pour être utilisé en différents temps de relevés et d'analyses et est susceptible de s'appliquer à d'autres objets d'études, en s'adaptant à l'objet étudié et au lieu.

Dans le but de prouver l'importance des traces d'outils dans l'histoire de l'architecture et dans la constitution de connaissance autour d'un édifice. Nous avons vu le cas de la carrière de l'éperon barré du Camp de César de Nucourt par Céline Blondeau<sup>49</sup>. Cette étude se veut être un exemple dans la recherche des traces d'outils et la réflexion historique que les résultats amènent. Ces résultats peuvent remettre en question nos savoirs et ouvrir sur de nouvelles hypothèses d'utilisation des outils dans la construction.

---

<sup>49</sup> : Céline Blondeau, *Une approche nouvelle des modes d'extraction et des traces d'outil*, Archéologie médiévale [En ligne], 40 | 2010, mis en ligne le 07 septembre 2018. URL : <http://journals.openedition.org/archeomed/13428>

De plus, l'étude des traces d'outils, comme dans le cas de du chantier de Notre-Dame de Paris, peut permettre de dater l'édifice, en le comparant à un corpus d'édifice similaire.

Pour finir, les études menées autour de la connaissance de l'histoire de l'Eglise de la Madeleine mettent en avant l'importance de croiser les analyses et informations obtenues par chaque spécialiste. Puisque chaque spécialiste va analyser le bâtiment avec des connaissances particulières, un questionnement précis et des méthodes de relevés multiples, qui lui permettent d'aboutir à des informations sur l'édifice. Ces informations sont plus intéressantes lorsqu'elles sont confrontées aux recherches faites par les autres chercheurs, le croisement de ces informations permettra d'acquérir une connaissance complète autour de l'édifice.

A la suite de ces études sur les différents moyens de datation, la pluridisciplinarité et les techniques numériques diverses qui sont utilisées sont apparus comme nécessaires pour créer une connaissance autour de l'édifice.

Cette pluridisciplinarité est mise en évidence actuellement, notamment sur le chantier de Notre-Dame de Paris. Au regard de la diversité des données, de la multitudes d'analyses, et du nombre de formats de rendus, il est apparu nécessaire, sur ce chantier historique, de créer un groupe de travail autour de ces questions, et ce afin d'harmoniser les recherches. Le numérique apparaît comme une science à part entière dans l'étude du patrimoine. Ces questionnements sur le numérique et le partage de donnée sont très importantes aujourd'hui et donnent lieu à de nombreux projets et recherches.

### **Altération :**

« Modification de l'état ou de la qualité d'une chose. » CNRTL

### **Carrière :**

« Une carrière est la zone d'exploitation d'une matière première appartenant à un faciès géologique et possédant des qualités techniques et mécaniques qui intéressent les bâtisseurs. Ces derniers utilisent des matériaux extraits par des hommes, dans certains types de construction ou de production. Ces matériaux font donc l'objet d'un commerce avec tout ce que cela comprend : un transport, un coût, une organisation et différents intervenants. C'est selon ces axes de recherche que les carrières de La Couronne ont été abordées dans le but de réaliser une étude à la fois complète, concrète et surtout utile. » Cécilia Pédini Les carrières de la couronne de l'antiquité à l'époque contemporaine, 2013

### **Connaissance (CNRTL) :**

« Acte de la pensée qui saisit un objet par les sens ou non avec implication plus ou moins grande du sujet de la connaissance. [...] Action ou acte de se faire une représentation, de s'informer ou d'être informé de l'existence de quelque chose; l'idée ainsi formée. »

### **Conception (CNRTL) :**

« Action de concevoir. Souvent associé à l'exécution, réalisation »

Concevoir : « [Le suj. désigne un être pensant, l'accent est mis sur l'activité abstractive de l'esprit] Former le concept, l'idée générale ou non d'un objet et, p. ext., se représenter un objet par la pensée. »

### **Conservation curative :**

Actions entreprises directement sur un bien pour arrêter une détérioration et/ou limiter une dégradation.

### **Construire (CNRTL) :**

Du latin "cum" avec qui donne l'idée de renforcer et "struo" empiler, verbe qui relie directement le métier de maçon

« Réaliser un édifice, un ouvrage d'art selon un plan déterminé. [...] Assembler des éléments selon un plan pour exécuter un mécanisme capable de fonctionner selon les prévisions. »

**Datation absolue :**

La datation absolue permet de donner une valeur chiffrée de l'âge d'un objet, d'un événement,...

Elle se base sur des instruments et techniques de mesure du temps, tel que la radioactivité (carbone 14, uranium, samarium,...), la thermoluminescence, la dendrochronologie, l'archéomagnétisme,...

**Datation relative :**

La datation relative permet de classer et d'organiser chronologiquement des événements géologique ou autre.

Très utilisée en géologie, elle repose sur plusieurs principes géologiques (superposition, continuité, recoupement, inclusion,...)

**Matériau (CNRTL):**

C'est la transformation de la roche en matériau de construction.

« Type de matière qui entre dans la construction d'un objet fabriqué. »

**Matérialité :**

C'est la perception que l'on en a, elle va dépendre de la mise en oeuvre, de la matière utilisée.

**Matérialisation :**

C'est la conception, la construction, c'est ce que fait l'architecte lorsqu'il pense le projet et qu'il le réalise.

**Matière (CNTRL) :**

« Substance dont sont faits les corps perçus par les sens et dont les caractéristiques fondamentales sont l'étendue et la masse. [...] Ce que l'artiste façonne pour réaliser son oeuvre. »

La matière correspond à la roche qui est créée par l'assemblage de minéraux

**Mise en oeuvre :**

Réalisation d'une pensée, d'un plan en un objet concret.



**Outil (CNTRL) :**

« Objet fabriqué, utilisé manuellement, doté d'une forme et de propriétés physiques adaptées à un procès de production déterminé et permettant de transformer l'objet de travail selon un but fixé. »

**Pierre :**

Matériau de construction formé de la roche d'où elle est extraite.

**Reconstruction :**

Construction d'un édifice ou d'un ensemble d'édifices en totalité ou en partie, dans le respect ou non de la forme initiale, après qu'ils aient été détruits ou fortement endommagés. Une reconstruction peut inclure des opérations de reconstitution

**Réhabilitation :**

« Opération d'urbanisme consistant dans le nettoyage et la remise en état d'un quartier ou d'un immeuble ancien. » CNTRL

« En géologie, l'altération, plus précisément l'altération des minéraux, est l'ensemble des modifications des propriétés physico-chimiques des minéraux, et donc des roches, par des réactions abiotiques, induites par les agents atmosphériques à l'origine de l'altération météorique (ou météorisation), les eaux souterraines, responsables de l'altération de subsurface, et les eaux thermales, à l'origine de l'altération hydrothermale  
» wikipédia

**Restauration :**

Actions entreprises sur un bien en état stable ou stabilisé, dans le but d'en améliorer l'appréciation, la compréhension et/ou l'usage, tout en respectant son intérêt patrimonial et les matériaux et techniques utilisés

**Roche :**

Assemblage de minéraux généralement solide et formé.

**Sculpteur** (Site Outils du tailleur de pierre) :

Il réalise des sculptures qui sont des œuvres non mesurables sur plan. Cela peut être une statue ou un bas-relief qui représente une scène avec des personnages. Ils utilisent des outils en commun avec le tailleur, mais en général de plus petit gabarit, ainsi que des outils qui lui sont spécifiques (rifloir, massette portugaise...). La sculpture en pierre est réalisée d'après un moulage en plâtre qui sert de base de mesure. On reporte les différentes mesures avec une «machine de mise au point».

**Tailleur de pierre** (Site Outils du tailleur de pierre) :

Travaille sur les chantiers de taille situés soit en sortie de carrière, soit sur les chantiers de construction. Il utilise une gamme importante d'outils de taille dont chaque type se décline en diverses formes et tailles. Il réalise des blocs taillés qui peuvent intégrer des moulures et des ornements. La taille correspond à tout le travail mesurable de façon mathématique et géométrique (par rapport à des plans, panneaux ou épures). De ce fait, un motif répétitif (billettes, oves, pointes de diamant...) formant une ornementation est classé dans la taille.

### Articles et dossiers scientifiques :

- Hurgon Jean-Philippe, *Au nom de la Pierre*, Mars 2017, L'architecture d'aujourd'hui n°417
- Exposition du Pavillon de l'Arsenal, *Pierre. Révéler la ressource explorer le matériau*, Commissaires scientifiques Thibault Barrault et Cyril Pressacco, présentée du 23 octobre au 2 décembre 2018
- Pédini Cécilia, *Exploitation et utilisation du calcaire de La Couronne dans l'Antiquité (Martigues, Bouches-du-Rhône)*, 2009, Revue archéologique de Narbonnaise, pages. 265 à 287
- MEYER Nathalie, Datation absolue et Datation relative, Futura Science, [en ligne] lecture : Décembre 2020. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-datation-absolue-15924/> et <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-datation-relative-15928/>
- Musée Cantonal de Géologie, La mesure du temps géologique, [en ligne] lecture : Décembre 2020. Disponible sur : [https://www.unil.ch/files/live/sites/mcg/files/shared/Publications/Depliant\\_Mesure\\_Temps.pdf](https://www.unil.ch/files/live/sites/mcg/files/shared/Publications/Depliant_Mesure_Temps.pdf)
- CAPELLE Jeanne, Reflectance Transformation imaging (RTI) et épigraphie, sur RAAN, [en ligne] lecture : Décembre 2020, Disponible sur : <https://raan.hypotheses.org/1326>
- GUILLON Odile, *La documentation par l'image observer, analyser, documenter*, CICRP
- Thierry Lejars et Jean-Baptiste Houal, *Le savoir faire des celtes à l'épreuves des nouvelles techniques d'imagerie numérique*
- Philippe Bromblet, *Guide « altérations de la pierre »*
- Alois Kieslinger, *Les principaux facteurs d'altération des pierres à bâtir*
- ICOMOS, *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*
- Sandrine Claude, Lisa Shindo, Jean-Louis Edouard. *L'église des Prêcheurs d'Aix-en-Provence : lecture archéologique et datations dendrochronologiques (La Madeleine, Aix-en-Provence)*. ARCADE. Ap- proche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Apr 2014, Aix-en-Provence, France. pp.151-170. hal-02143984

### Vidéos et colloques :

- Frédéric Létoffé, <https://www.citedelarchitecture.fr/fr/video/levolution-des-metiers-de-la-taille-de-pierre-travers-les-siecles>
- Interview : <https://www.ina.fr/video/RAC01011418/a-caritat-svp-la-vieille-charite-a-marseille-video.html>
- LIEVAUX Pascal, REGERT Martine, DILLMANN Philippe, MAGNIEN Aline, *Introduction au chantier scientifique*, dans : Chantier scientifique Notre-Dame – état des lieux et perspectives, [Colloque tenu à l'Institut National du Patrimoine, 2, rue Vivienne à Paris, les 19 et 20 Octobre 2020], [en ligne] Disponible sur : [https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir\\_videos](https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir_videos)
- MAGNIEN Aline, CHAOUI-DERIEUX Dorothée, LAVIER Catherine, DESCHAMPS Stephane, *Des gravats aux vestiges : retour sur un protocole expérimental et des collaborations inédites*, dans : Chantier scientifique Notre-Dame – état des lieux et perspectives, [Colloque tenu à l'Institut National du Patrimoine, 2, rue Vivienne à Paris, les 19 et 20 Octobre 2020], [en ligne] Disponible sur : [https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir\\_videos](https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir_videos)
- GALLET Yves, ALBRECHT Stephan, LEROUX Lise, MOULIS Cédric, YBERT Arnaud, WARME Nicolas, *Groupe travail « pierre »*, dans : Chantier scientifique Notre-Dame – état des lieux et perspectives, [Colloque tenu à l'Institut National du Patrimoine, 2, rue Vivienne à Paris, les 19 et 20 Octobre 2020], [en ligne] Disponible sur : [https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir\\_videos](https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir_videos)
- DELUCALivio, GRANIERXavier, RODIERXavier, JACQUOT Kevin, MALAVERGNE Olivier, *Groupe travail « données numériques »*, dans : Chantier scientifique Notre-Dame – état des lieux et perspectives, [Colloque tenu à l'Institut National du Patrimoine, 2, rue Vivienne à Paris, les 19 et 20 Octobre 2020], [en ligne] Disponible sur : [https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir\\_videos](https://miti.cnrs.fr/colloque/action-transverse-miti-chantier-scientifique-notre-dame/#voir_videos)

### **Livres :**

- Bessac Jean-Claude, *Glossaire des termes techniques*, 2002, Gallia, Tome 59, pages 189 à 194
- Laurent Jean Paul, *Construire en pierre massive*, 2011.
- Perraudin Gilles, *Construire en pierre de taille aujourd'hui*, 2013, Dijon : Les presses du réel.
- Pédini Cécilia, *Les carrières de la couronne de l'antiquité à l'époque contemporaine*, 2013, Publications du Centre Camille Jullian
- Pouillon Fernand, *Les pierres Sauvages*, 1964, Editions Du Seuil, Extrait page 1 à 2
- *Le relevé en architecture ou l'éternelle quête du vrai*, 2011, édition Lieux dits, Colloque de la Cité de l'architecture et du patrimoine.
- Encyclopédie des Métiers, *La maçonnerie et la taille de pierre*, Paris, 2007, Librairie du Compagnonnage.

### **Mémoires :**

- Thuries Lionel, *Outils numérique et évolution de la conception architecturale*, 2013, Séminaire Forme information Novation Conception - Architecture Virtuelle, sous la direction de J.P. Goulette et S. Marques
- Petrot Romain, *Poétique de la pierre, de la compression à l'émotion architecturale*, 2019, ENSA Paris Val de Seine, sous la direction de Cyrielle Faivre-Aublin.

### **Sites internet :**

- BESTREMA : Bureau d'études structure pour les monuments anciens : <http://bestrema.fr>
- BRGM, service géologique national : <https://www.brgm.fr/>
- CTMNC, Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction : <http://www.ctmnc.fr/>
- INRAP, Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (dossier sur les carrières) [https://www.inrap.fr/dossiers/Archeologie-des-carrieres/Histoire-de-l-extraction/Prehistoire#.XrvDry\\_pM1h](https://www.inrap.fr/dossiers/Archeologie-des-carrieres/Histoire-de-l-extraction/Prehistoire#.XrvDry_pM1h)
- Les outils de tailleurs de pierre : <http://ruedeslumieres.morkitu.org/apprendre/outils/index.html>
- La recherche des mathématiques, CNRS - images des mathématiques : Gaspard Monge. <https://images.math.cnrs.fr/Gaspard-Monge,1094.html>
- Pierres Naturelles : <http://www.pierresnaturelles.org/wiki-pierre/15-extractionpierredetaille/consulter>
- SNROC, Syndicat National des Industries de Roches Ornementales et de Construction (site en général) [http://www.snroc.fr/fr/bassins-d-extraction\\_51.html](http://www.snroc.fr/fr/bassins-d-extraction_51.html)
- Wikipédia sur la géologie : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Géologie>
- Chantier scientifique pour la restauration de Notre-Dame de Paris, Groupe de Travail « Données Numériques ». Disponible sur : <https://www.notre-dame.science>
- Cultural Heritage Imaging, Reflectance Transformation Imaging (RTI), [en ligne] Lecture Novembre 2020, Disponiblesur : <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/>





- Protocole d'acquisition de l'Eglise de la Madeleine (avant visite de site et acquisition), fait en duo avec Leyder Chloé
- Compte rendu visite de la Madeleine et acquisition effectuée, fait en duo avec Leyder Chloé
- Tableau de recherche des altérations et traces d'outils

# Protocole d'acquisition laser et photogrammétrique

Dans le but de pratiquer un relevé architectural général de l'Eglise (intérieur et extérieur).

## ○ Historique et contexte :

L'église de la Madeleine, anciennement église des Prêcheurs, est située au Nord Est de la place de Prêcheurs à Aix en Provence.

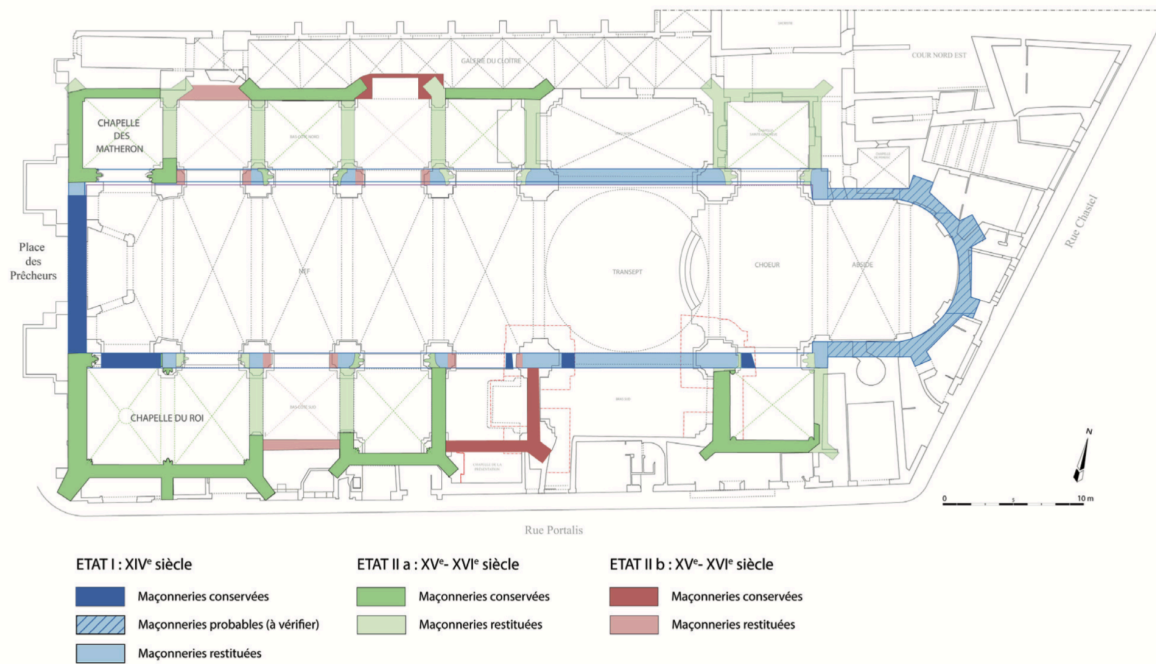
L'église s'établie à Aix en 1272, par une communauté de moines Dominicains, elle est crée avec un couvent accolé à l'église sur son bas côté au Nord.



*Le quartier Bellegarde et la place des Prêcheurs au XVI<sup>e</sup> siècle (extrait du plan d'Aix-en-Provence par François de Belleforest, 1573-1575). Q : église des Prêcheurs.*

L'édifice fait 63 mètres de long sur 27 mètres de large. Les frères dominicains confient aux maitres Jean et Laurent Vallon en 1691 la rénovation de l'église. Ils ont entre 1691 et 1703 réalisé des travaux qui donnent à l'édifice ses dispositions actuelles. Mais aussi son architecture classique qui ne permettent que difficilement de percevoir les campagnes de construction qui ont débuté à la fin du XIII<sup>e</sup> siècle.

En 2012 et 2013, les Monuments historiques demandent une restaurations et une consolidations de l'église qui ont conduit a des fouilles préventives. Ces fouilles ont permis de mettre en avant la présence des reconstructions mené par les frères Vallon dans les fondation mais également dans les parties hautes des élévations.



*Plan de l'église de la Madeleine avec les datations des éléments la constituant*



*Photographie aérienne (google maps)*



## ○ Protocole d'acquisition laser

### ◆ Fiche matériel a disposition :

- Scanner Laser FARO
- Pied et nivelle sphérique
- Mires sphériques blanches (diamètre 20cm)

### ◆ Acquisition lasergrammétrie :

Tout d'abord il faut définir l'emplacement des différentes stations d'acquisition et notamment la station qui sera de référence. La station de référence permet de recalculer les relevés de l'intérieur et de l'extérieur sur un même nuage, l'assemblage des données pourra se faire sur Cloud Compare.

Après avoir choisi les stations d'acquisitions il faut placer les mires sphériques, il faut que de chaque station au moins trois mires soient visibles, et que ces trois mires soient présentes sur au moins une autre acquisition.

L'emplacement des mires est importante car elles permettent un géo-référencement et peut remplacer un relevé disto, et permettent donc de recalculer sur le nuage de point que créera le relevé laser l'acquisition photo-grammétrique qui apporte de nouvelles connaissances (couleur, plus de données de mesures,...)

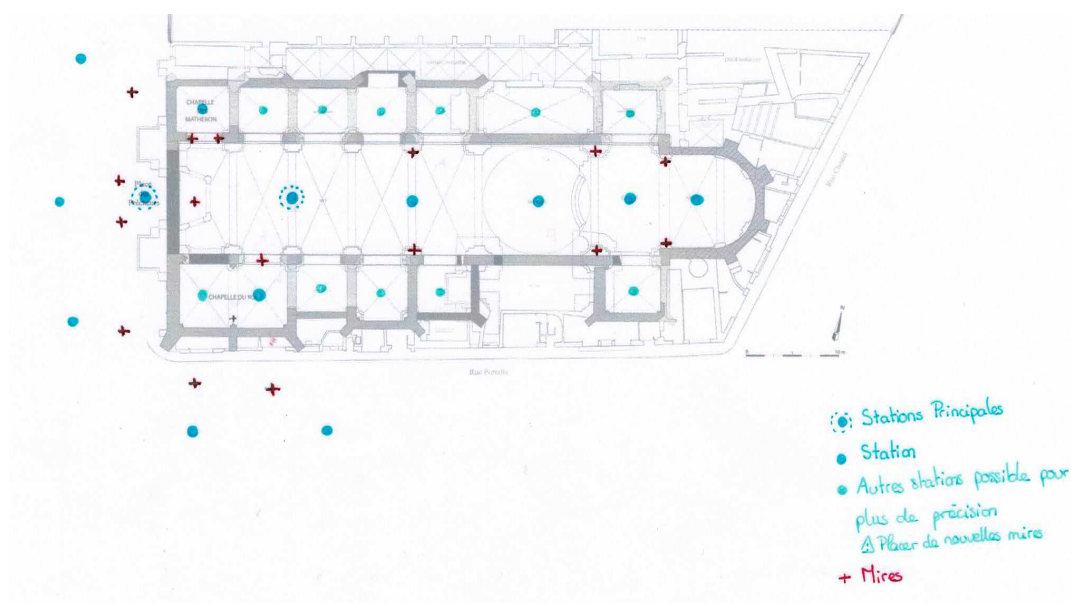
Une fois les mires mises en place, l'acquisition peut commencer. A chaque station il faut faire attention à ce que le scanner laser soit de niveau, le niveau se trouve sur le pied portant le scanner laser.

La station de référence doit avoir une qualité et une résolution d'acquisition plus importante que les autres. La qualité d'acquisition se définit sur le laser et en fonction de la qualité prendra un temps plus ou moins long. Le scanner laser prendra des informations à une longueur de portée précise (qualité) et un nombre de points au millimètre (résolution).

### Attention :

- Lors de l'acquisition du scanner laser il ne faut pas regarder le laser.
- Lors de l'acquisition sur le site il faudra parcourir les rues Portalis et Chastel pour voir s'il n'y a pas des vues extérieures sur l'église à l'arrière des maisons qui l'entourent. Le relevé lasergrammétrique évolue en fonction des conditions d'acquisition et de l'environnement qui peut être difficilement prévisible avant d'être sur le site.

### ◆ Proposition d'acquisition lasergrammétrique de l'église de la Madeleine :



## ○ Protocole d'acquisition photogrammétrique :

- ◆ But : avoir des informations sur la morphologie d'un objet, la géométrie et la texture d'une surface.

Attention : pour un relevé à l'intérieur, il est important d'avoir une luminosité suffisante, constante et homogène. Pour l'extérieur, il faut un éclairage constant et donc un temps nuageux est à privilégier.

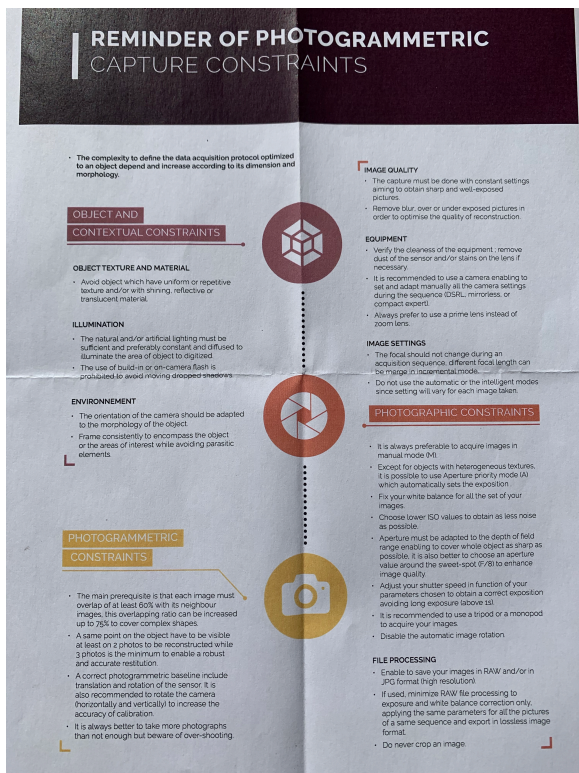
- ◆ Fiche matériel à disposition :

- 2 appareils photographique Nikon (reflex)
- Des cibles plates
- un trépied (permet d'utiliser des vitesses plus lentes sans avoir de flou de bougé)

- ◆ Réglage de l'appareil : *(La méthodologie pour le paramétrage photographique : voir le chapitre 3.3 donné)*

- Préalablement, vérifier la propreté de l'objectif et du capteur de l'appareil photo.
- Pour les paramètres photo : mettre la résolution maximal, choisir un encodage jpeg fine (haute).
- Vérifier que la balance des blancs n'est pas en mode automatique.
- En fonction de l'objet, choisir une mise au point automatique ou manuelle.
- Passer en mode d'exposition manuelle (M) ou priorité à l'ouverture (A)
- Adapter le cadrage de l'objet : changement de focal ou en modifiant la distance à l'objet.
- Paramétrer la sensibilité manuellement en 200 ISO
- Régler l'ouverture du diaphragme sur F/8
- Modifier le réglage de la vitesse pour une meilleur exposition en mode manuel, ou vérifier la vitesse proposée par la mode A :
  - Si la vitesse d'obturation est inférieure à 1/50s il y a un fort risque de flou de bougé (utilisation du trépied recommandé, avec ces réglages)
  - Si la vitesse d'obturation est inférieure à 1/15s trépied ou support obligatoire (prévoir aussi l'activation du retardateur pour éviter le flou de bougé à cause de l'action du mécanisme de déclenchement).
  - Effectuer une prise de vue test, pour vérifier si nécessaire que les réglages définis permettent une prise e vue nette (plus la focale est longue, plus des vitesses d'obturation courte s'imposent).
- Une seconde itération sur les réglages sera sans doute nécessaire, pour affiner ces derniers il faudra faire un « compromis » entre l'ouverture et la sensibilité :
  - En préférant agir sur l'ouverture (autour de F/8) en prenant en compte l'impact en terme de profondeur de champ, plutôt que sur la sensibilité
  - En modulant l'ISO (en préférant une sensibilité la plus basse possible), si le réglage de l'ouverture nécessite des valeurs extrêmes).





Attention : Ne jamais recadrer une image.

◆ Pour tout relevé :

- Placer les cibles pour un meilleur traitement des images et requalibrage des images par la suite)

Le disto est pratiqué par le laser (dans notre cas). Mais on peut faire un disto séparément avec l'appareil adéquat pour le relevé photogrammétrie

Ci joint - Autre méthodologie de réglage similaire

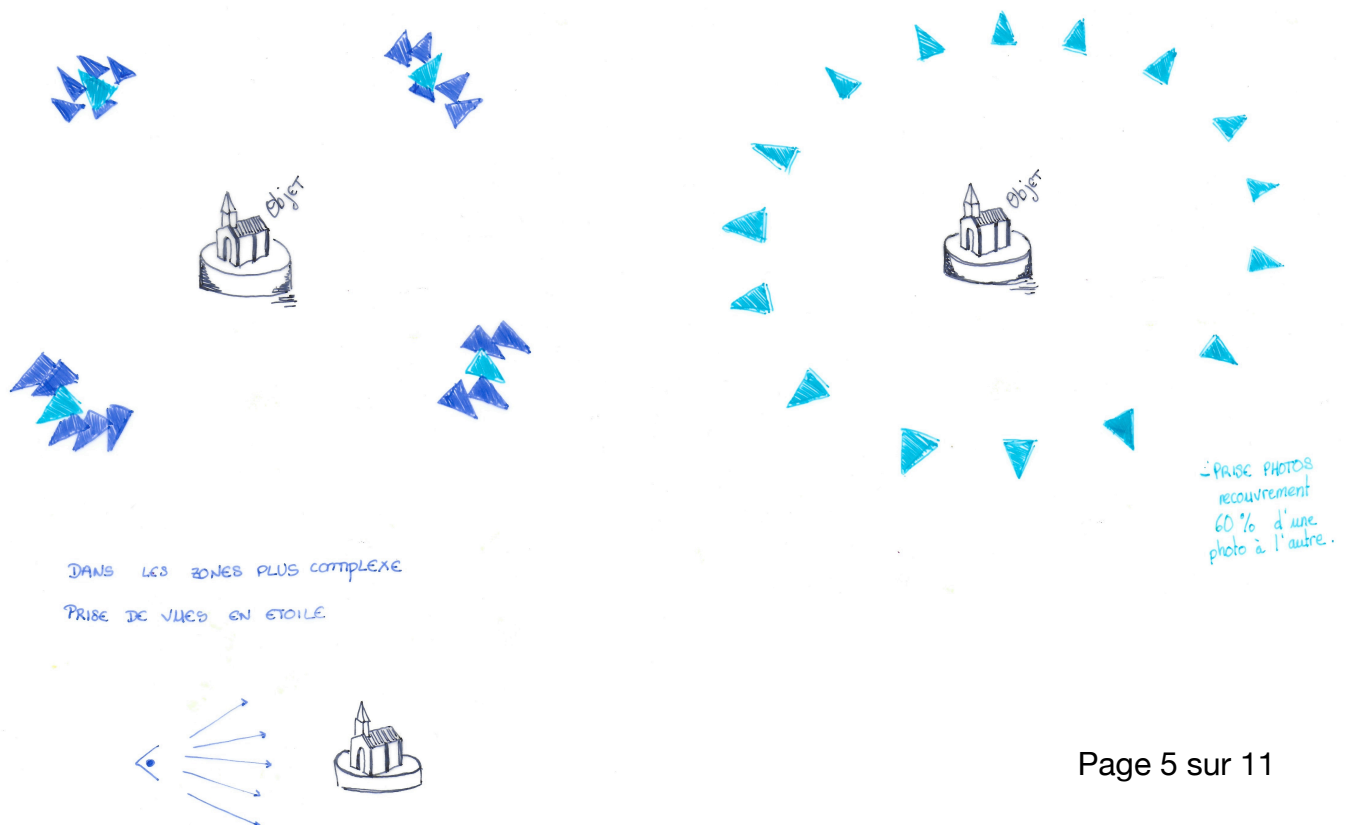
◆ Protocole d'acquisition photogramétrique de manière générale :

Faire une photographie test avant toute séquences, ceci sera plus facile pour trier et analyser les séquence.

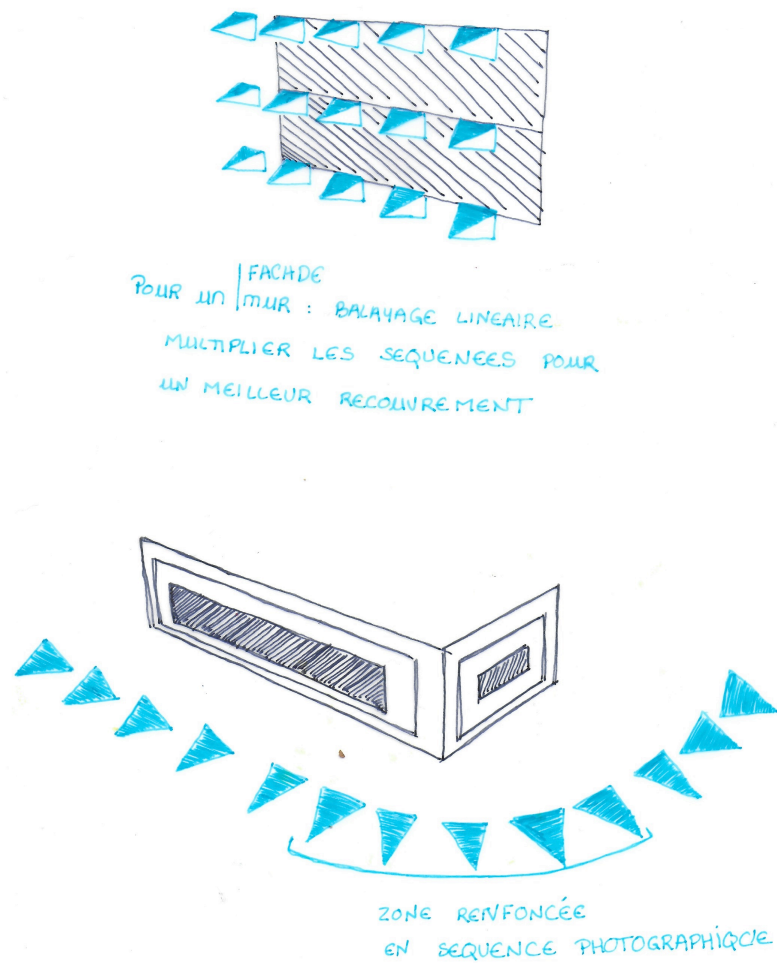
Plan avec les différentes méthodes de prises de vues : circulaire, en étoile ou linéaire

Chaque prise de vue doit respecter un recouvrement minimal 60% d'une prise photographique à l'autre. Ce recouvrement est obtenu par déplacement le plus régulier possible.

Attention : Un point ne peut être reconstruit que s'il est visible sur minimum deux images (en respectant le recouvrement minimal)



- ◆ Pour un mur ou une fresque : déplacement parallèle de manière constante

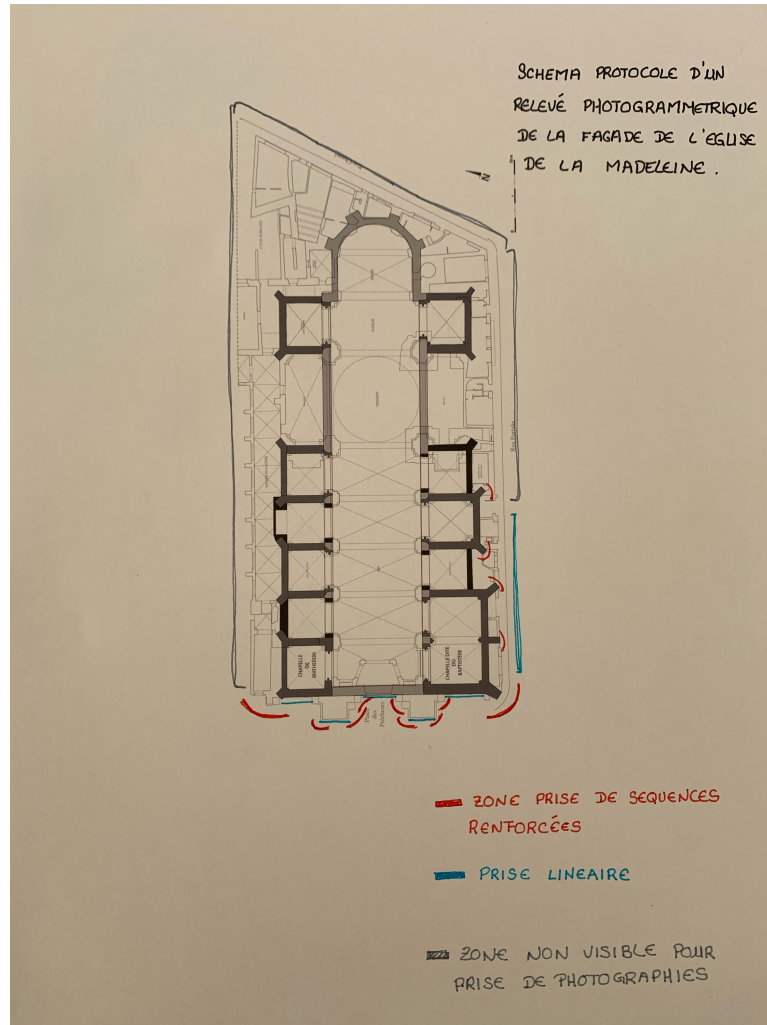


Plusieurs protocoles suivant l'objet à analyser : Une méthode circulaire pour les objets comme une statue de manière régulière. Pour plus de précision des vues en étoile ou en plongée/contre-plongée pour minimiser les zones d'occlusions. Sinon il faudra compléter par d'autres séquences de prises photographiques. C'est la complexité de l'objet qui permet de déterminer s'il faut augmenter le nombre de photographies ou non.

Dans notre cas il faudra sûrement faire un protocole "hybride" : c'est à dire un mélange entre la prise de vue circulaire pour le tour de l'église, en étoile pour les renforcements ou les parties qui ressortent. Et des séquences cinéaires pour avoir le plus de recouvrement possible de la zone à analyser.

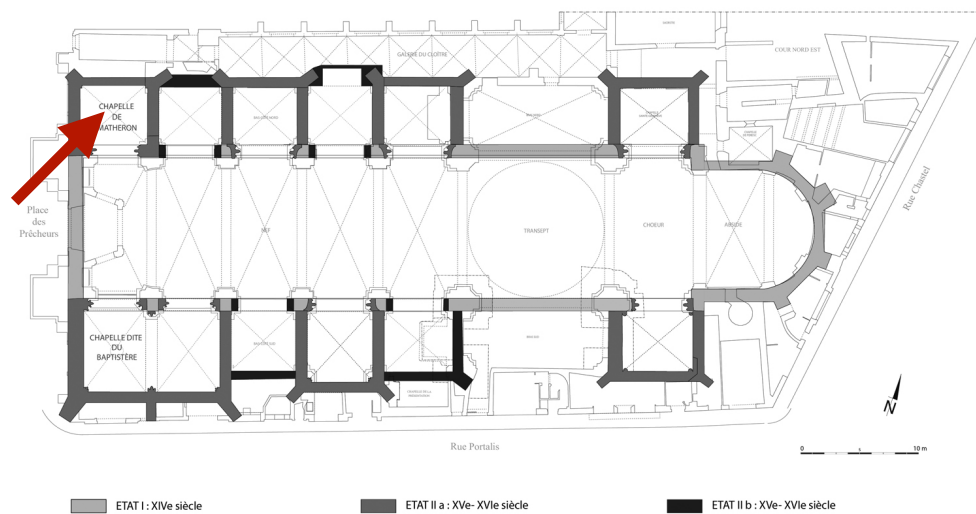
◆ Proposition d'acquisition photogrammétrique :

La méthode d'acquisition peut évoluer en fonction de l'objet, certains éléments qui ne sont visibles que sur place peuvent influencer les méthodes employées.  
Notamment dans ce cas au niveau de l'entrée une prise en étoile peut être nécessaire pour appréhender la/les voûtes.





○ **Annexe partie plus détaillée** : chapelle de Matheron



*Voûte de la chapelle des Matheron (cl. G. Thomann)*

◆ Lors de notre visite :

- Relevé à la main : croquis et esquisse qui peuvent être annotés qui apportent également des connaissances sur l'objet d'étude, dont ils sont des images, un relevé. (Matériel : papier crayon mètre ruban ou laser)
- Pour avoir des informations supplémentaires il est toujours judicieux d'avoir un relevé pratiqué à la main (avec le tableau des altérations réalisé par Lélia). Ce tableau permet d'avoir des informations plus spécifiques avec des mots précis qui permettent une autre appréhension du bâtiment et de son état. Ce tableau ne se substitue pas à l'importance du rapport et/ou du légendage des différents documents.
- Laser : une station centrale
- Photogrammétrie : relevé circulaire et relevé en étoile pour avoir la totalité de la voute et des murs.

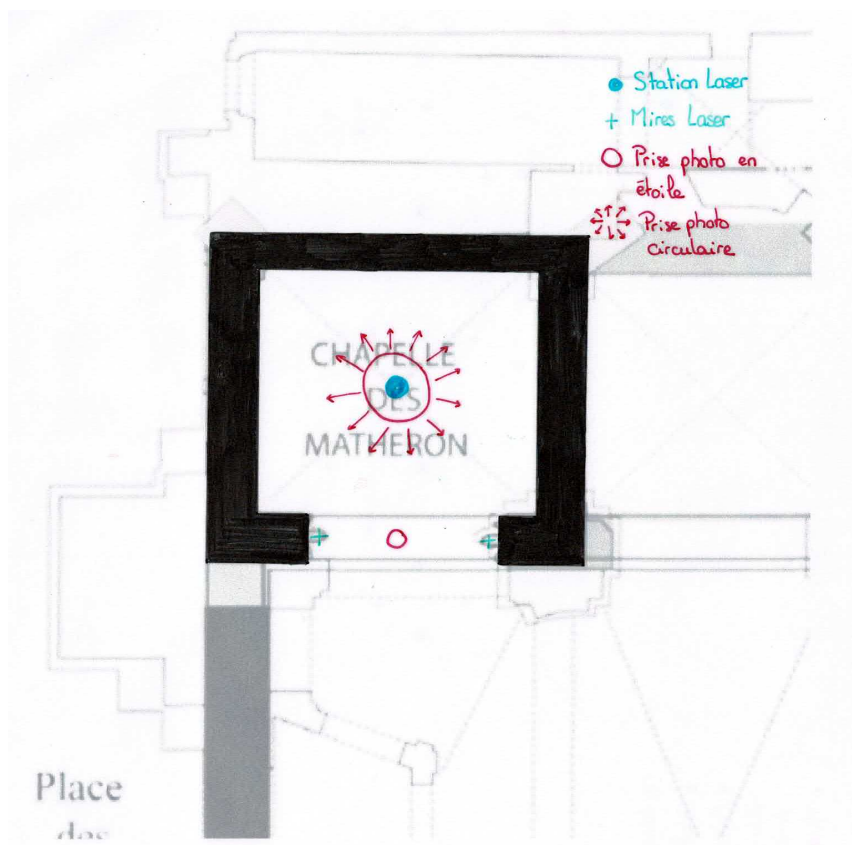
◆ Tableau des altérations

Première approche avec les altérations générale une deuxième phase de classification et d'analyse des altérations pourra être effectuée avec les termes plus précis de l'ICOMOS. Mais aussi en ajoutant le facteur de la trace de l'outil qui peut apparaître comme une altération mais qui ne l'est pas.

Tableau 1

| Altération                                     | Définition (ICOMOS)                                                                                                                                                                                                                                                             | Présence sur l'édifice | Description/Etat de Dégradation | Endroit de l'altération (plan) | Photographie |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------|
| <b>Fissure et Déformation</b>                  | Une fissure est un plan de rupture vu en coupe qui résulte de la séparation d'une pierre en deux parties. Une déformation est un changement de forme conduisant à la courbure (convexe ou concave), au bombement ou à la torsion d'une pierre                                   |                        |                                 |                                |              |
| <b>Détachement</b>                             | Perte locale de matière.                                                                                                                                                                                                                                                        |                        |                                 |                                |              |
| <b>Figure induite par une perte de matière</b> | Absence de tout ou partie d'une pierre. Cette figure d'altération affecte fréquemment les éléments proéminents et particulièrement exposés des sculptures (nez, orteils, doigts).                                                                                               |                        |                                 |                                |              |
| <b>Altération chromatique et dépôt</b>         | Modification d'un ou plusieurs des paramètres caractérisant la couleur de la pierre : teinte, clarté, saturation. Accumulation superficielle de matériaux exogènes formant une couche peu cohérente et d'épaisseur variable.                                                    |                        |                                 |                                |              |
| <b>Colonisation biologique</b>                 | L'expression colonisation biologique s'applique surtout aux plantes et aux microorganismes tels que bactéries, cyanobactéries, algues, moisissures et lichens (symbioses des trois derniers). Il s'applique aussi aux structures fabriquées par des animaux, tels que des nids. |                        |                                 |                                |              |

- ◆ Schéma des acquisitions lasergrammétrique et photogramétrique. Ce schéma risque de changer en fonction de la visite sur le site et des éléments présents.





# Compte rendu jeudi 14 octobre 2020 - Eglise de la Madeleine

---

LEYDER Chloé & PERRIN Lélia

L'Eglise de la Madeleine anciennement Eglise des Prêcheurs date du moyen-âge, avec un style de l'époque plutôt austère et un oculus.

Au 19<sup>e</sup> siècle, les frères Vallons ont réhabilité l'église. Ils ont notamment collé une nouvelle facade sur l'ancienne.

Depuis le 17<sup>e</sup> siècle l'Eglise prend l'habitude de louer les espaces extérieurs entre les arcs boutant à des familles pour y installer leur commerce et leur habitation. Au cours du temps, les arc-boutants sont démolis et grignotés, pour pouvoir construire des habitations plus grande et rentabiliser l'espace foncier. Malheureusement ces méthodes impactent la stabilité de l'édifice. Au XX<sup>e</sup> siècle, la mairie achète ces espaces qui sont aujourd'hui des magasins comme les échoppes créée au départ mais ces constructions ne sont plus habitable car trop petite. Certaines de ces constructions n'ont plus une structure sûre.

Il y a très peu de fondation, l'église repose sur environs 1/1,5 mètre de fondation.

Il y a deux types de pierre qui composent cette église : la pierre de Bibémus, qui a des couleurs jaunes et roses et une pierre provenant du Var qui a des couleurs jaunes.

La carrière de Bibémus se situe à Aix-en-Provence au pied de la Sainte Victoire. La pierre qui y est extraite est sablonneuse, très ocre. Elle est issue du compactage du Burdigalien, on y trouve quelques coquillages. La pierre y est extraite depuis l'antiquité, la carrière a été ouverte par les Romains. C'est une pierre très fragile.

Lors des travaux de réhabilitation, les artisans ont travaillé avec de la chaux pour recristalliser les pierres qui se desquamaient et qui fragilisaient la stabilité de l'édifice mais surtout des décors au niveau de la facade. La facade est enduite pour protéger la pierre du mauvais temps, la pierre était systématiquement enduite lors de la création de la facade au 19<sup>e</sup> siècle pour la protéger. Si cette pierre n'est pas recouverte et est exposé à la météo elle redevient sable. De plus, les analyses ont permis de révéler la présence d'argile gonflante qui accélère et provoque également la desquamation.

La facade des frères Vallon vient se plaquer sur l'ancienne facade qui n'avait pas été finie et qui était très dégradée. La facade actuelle n'a pas de structure elle est seulement posée. Les frères Vallon ont joué sur différentes couleurs sur cette facade, entre blanc, jaune, et rose.

Lors de la restauration les pierres apparentes ont été nettoyé à l'aide d'un système aqueux, composé d'eau et d'adjuvant. Au départ, le système de nettoyage se faisait par compresse (en différentes étapes) mais au fur et à mesure du nettoyage les restaurateurs se sont rendu compte que la pierre était résistante et pouvait supporter un nettoyage plus fort en y appliquant directement le système aqueux. Ce nettoyage ne permet pas la pénétration des nettoyeurs à l'intérieur de la pierre.

Lors de cette restauration des problèmes de structure ont été révéler. Ce qui a nécessité l'ajout de tirant notamment dans la facade, mais les problèmes de structure étaient surtout à l'intérieur dû au grignotage des arc-boutants et des fondations peu profonde et ont nécessités des reprises plus importante. Les tirants qui soutiennent la facade passent

dans la structure de l'ancienne facade, mais ces tirants sont aussi présent à l'arrière des sculptures. Lors de la pose de ces tirants de l'eau a été utilisé ce qui a fait travailler la pierre et qui aujourd'hui apparait en surface par des trace d'humidité. La pierre va donc travailler différemment avec la présence de l'eau.

Les pierres ont été partiellement reprises. Le remplacement de celles ci ont été faite seulement si cela était nécessaire.

Lorsque les décors tombaient ils étaient auparavant recollé à l'aide de résine ou de plâtre ce qui n'est pas une bonne solution pour la pierre. Sur la facade une couvertine en plomb a été rajoutée pour protégé la pierre.

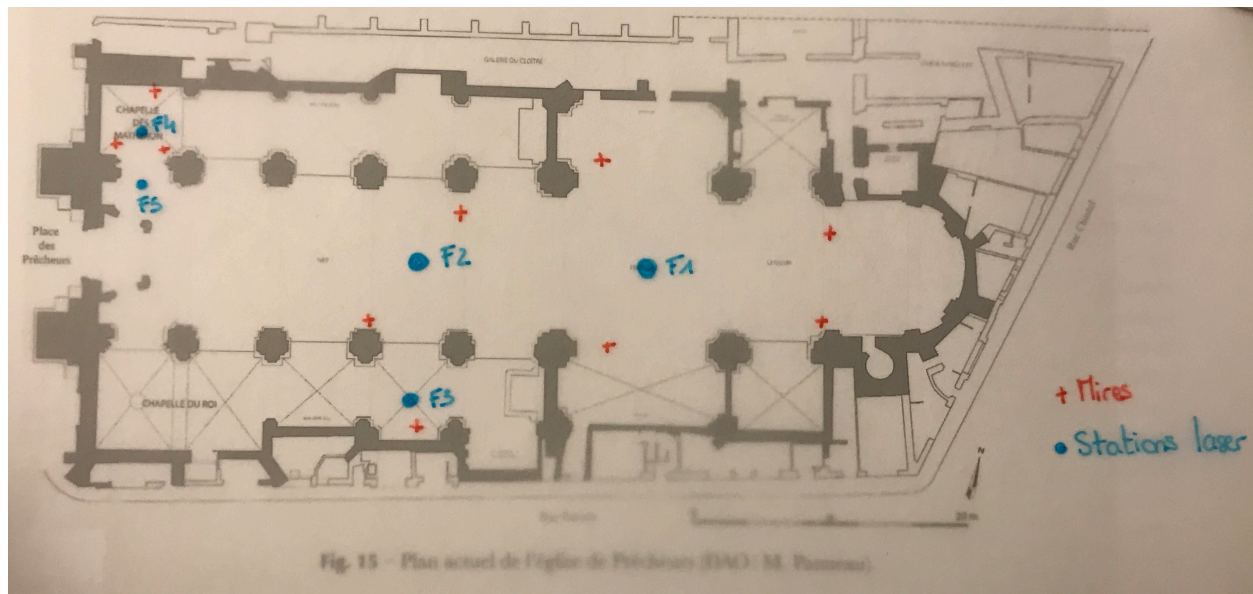
A l'intérieur, se trouve un orgue du 18e siècle, qui est aujourd'hui très recherché par les musiciens.

Pour les décors des sondages stratigraphiques ont été effectué ainsi que des photogrammétries sous différentes lumières pour faire apparaitre les différentes mains qui ont peint les peintures murales, faire apparaitre des dessins sous la première couche. Une analyse des problèmes d'humidité a aussi été faite et est principalement dû aux constructions qui se sont apposées à l'église et aussi du sol.

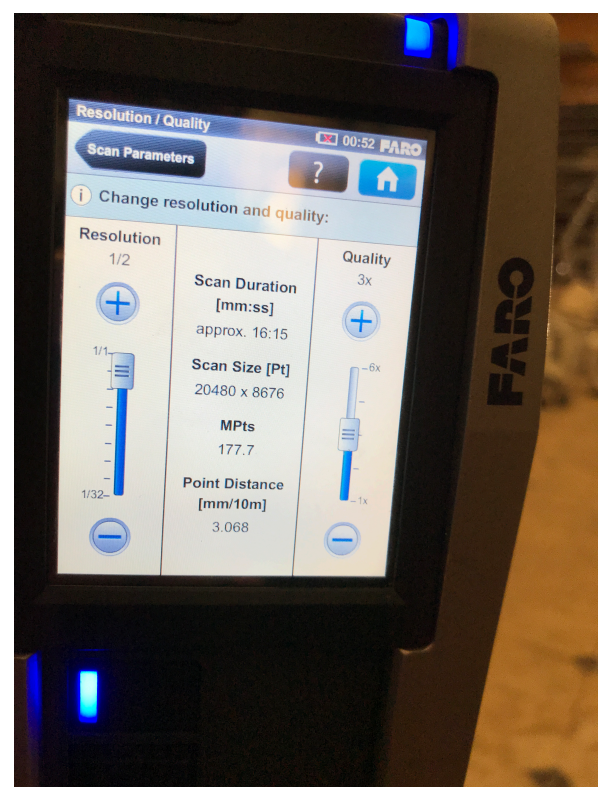
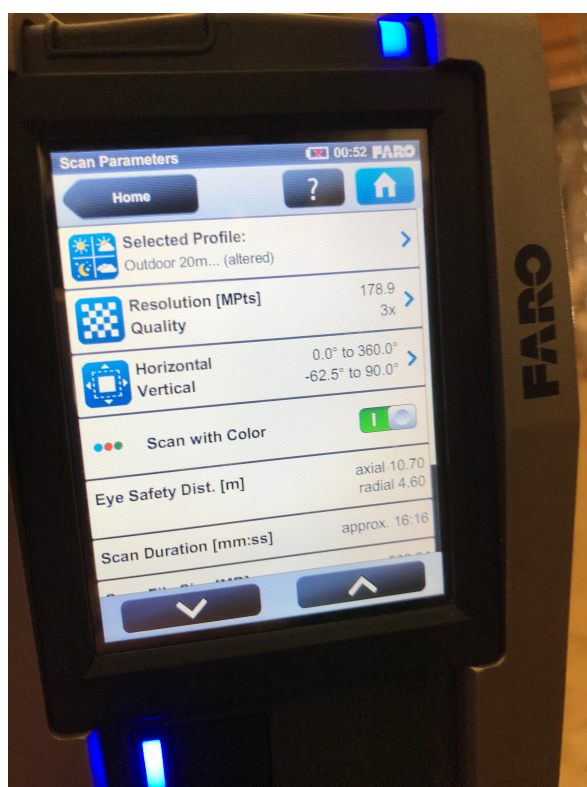




## Acquisition Laser effectuée



Plan du relevé effectué avec l'emplacement des stations laser et des mires.



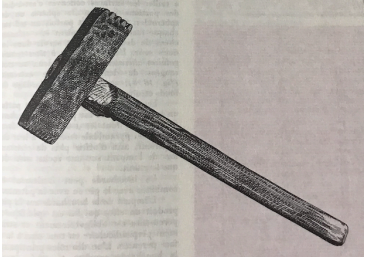
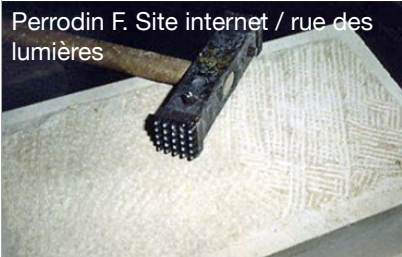
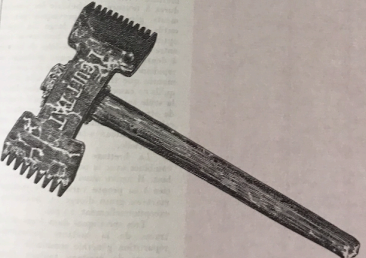
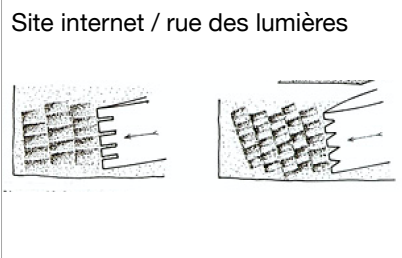
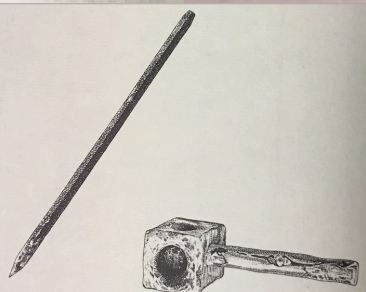
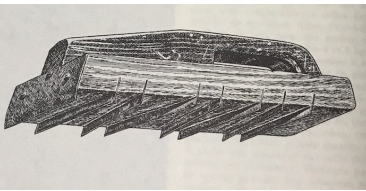
Réglage du scanner laser pour les relevés effectués

## Principales altérations de la pierre

| Altération                                     | Définition (ICOMOS)                                                                                                                                                                                                                                                             | Exemple photographique (extrait de l'ICOMOS)                                          |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fissure et Déformation</b>                  | Une fissure est un plan de rupture vu en coupe qui résulte de la séparation d'une pierre en deux parties. Une déformation est un changement de forme conduisant à la courbure (convexe ou concave), au bombement ou à la torsion d'une pierre                                   |    |
| <b>Détachement</b>                             | Perte locale de matière.                                                                                                                                                                                                                                                        |   |
| <b>Figure induite par une perte de matière</b> | Absence de tout ou partie d'une pierre. Cette figure d'altération affecte fréquemment les éléments proéminents et particulièrement exposés des sculptures (nez, orteils, doigts).                                                                                               |  |
| <b>Altération chromatique et dépôt</b>         | Modification d'un ou plusieurs des paramètres caractérisant la couleur de la pierre : teinte, clarté, saturation.<br>Accumulation superficielle de matériaux exogènes formant une couche peu cohérente et d'épaisseur variable.                                                 |  |
| <b>Colonisation biologique</b>                 | L'expression colonisation biologique s'applique surtout aux plantes et aux microorganismes tels que bactéries, cyanobactéries, algues, moisissures et lichens (symbioses des trois derniers). Il s'applique aussi aux structures fabriquées par des animaux, tels que des nids. |  |



## Extrait des outils utilisés pour travailler la pierre

|                                                                       | Les outils       | dessin de l'outil (provenant de l'Encyclopédie des métiers, La maçonnerie et la taille de pierre) | Trace qu'il laisse sur la pierre (s'il y en a une)                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Les outils de la taille de pierre : de l'ébauche à la finition</b> |                  |                                                                                                   |                                                                                                                                            |
|                                                                       | La boucharde     |                 |  Perrodin F. Site internet / rue des lumières           |
|                                                                       | La bretture      |                |  Site internet / rue des lumières                      |
|                                                                       | La broche        |               |  Perrodin F. Site internet / rue des lumières         |
|                                                                       | La chasse        |               |  Jérôme Dorkel, 2014/ site internet Oeuvre Notre Dame |
|                                                                       | Le chemin de Fer |               |  Perrodin F. Site internet / rue des lumières         |

### Tableau pour identifier les altérations et/ou les traces d'outils

[illegible]



