

Zeitschrift:	Monuments vaudois. Hors-série
Herausgeber:	Association Edimento - pour le patrimoine
Band:	2 (2021)
Artikel:	Images de la pluie battante : les méthodes de relevé et leur utilisation pour l'analyse semi-automatique des dégradations
Autor:	Stefani, Chiara / Feihl, Olivier
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1053474

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Images de la pluie battante

Les méthodes de relevé et leur utilisation pour l'analyse semi-automatique des dégradations

Chiara Stefani et Olivier Feihl

Archéotech SA

En 2017, sur mandat de l'État de Vaud, le bureau Archéotech SA, spécialiste et pionnier de l'application des nouvelles technologies au service du patrimoine historique, a entrepris la réalisation d'un relevé numérique complet de la cathédrale de Lausanne. Cette opération s'est déroulée entre août et septembre 2017 et a permis d'acquérir le «double numérique» du monument, constituant ainsi le support fondamental pour l'analyse semi-automatique des altérations. Ce document présente la méthodologie adoptée et le processus de traitement des données 3D.

MÉTHODOLOGIE DE RELEVÉ

Plusieurs techniques ont été utilisées pour permettre la réalisation de ce «double numérique» de la cathédrale; nous les présentons brièvement ici.

LE POLYGONE DE RÉFÉRENCE

Un polygone géodésique de référence a été établi à l'intérieur et à l'extérieur de l'édifice en matérialisant des points fixes avec des vis inox fixées dans les joints et mesurées avec une station totale de premier ordre Leica TS15. Le polygone a été refermé avec une erreur moyenne quadratique de deux millimètres.

LA LASEROMÉTRIE

Cette technique consiste à mesurer à grande vitesse les zones visibles du bâtiment en projetant un rayon laser à 360 degrés dans le plan horizontal et à 340 degrés dans le plan vertical. Chaque point d'impact du laser permet de connaître avec une précision millimétrique sa position spatiale ainsi que la valeur d'intensité avec laquelle la surface renvoie la lumière du laser. Chaque mesure est réitérée trois fois afin d'éliminer les ambiguïtés (**fig. 1**). Le scanner est déplacé de façon à pouvoir projeter de la lumière sur toutes les surfaces de manière la plus homogène possible. Les instruments utilisés sont des capteurs de la marque Faro série S, modèles haut de gamme de ce fabricant germano-suisse (**fig. 2**). La position de chaque station est géoréférencée dans le réseau géodésique par le placement et la mesure de repères, qui sont détectés automatiquement par les programmes de post-traitement. Pour le relevé intégral de la cathédrale, ce sont plus de 1500 stations de scan qui ont été nécessaires, totalisant un nuage de plus de 20 milliards de points.

Dans la phase de post-traitement, le nuage peut être coupé et les pixels projetés orthogonalement sur n'importe quel plan de l'espace; on obtient alors une ortho-image dans laquelle toute parallaxe a disparu (**fig. 4**). L'intensité de chaque pixel permet d'obtenir une image dans laquelle la photométrie est le reflet de la lumière laser sur la surface balayée (longueur d'onde de 1550 nanomètres).



1 Pour chaque position du scanner, on obtient une vue panoramique à 360 degrés ; tout ce qui se voit dans ces images est mesuré.



2 Le scanner Faro S350 lors de la mesure du Portail peint ; l'instrument tourne à 180 degrés sur le plan horizontal et le miroir tournant projette le rayon laser sur le plan vertical à raison de 980 000 mesures par seconde.



3 Les cibles nécessaires à l'orientation et au géoréférencement des clichés photogrammétriques ont été placées en divers endroits des façades à l'aide d'un camion nacelle.

Les mêmes ortho-images peuvent être obtenues en colorisant les pixels dans leur profondeur par rapport au premier plan afin de mettre en évidence les différences de relief (**fig. 5**).

LA PHOTOGRAMMÉTRIE AUTOCORRÉLATIVE

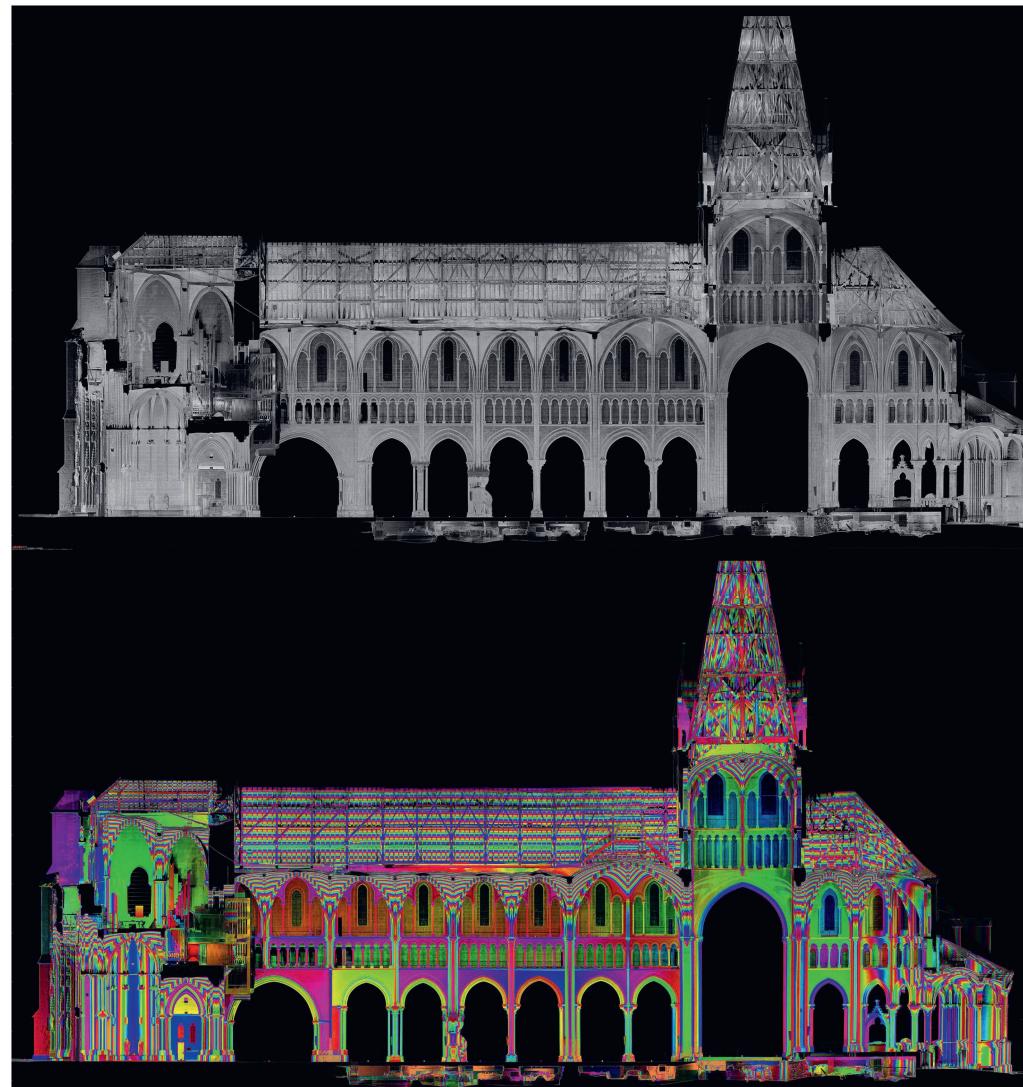
Cette technique permet de mesurer l'espace tridimensionnel à l'aide de multiples photographies prises depuis des points de vue différents et se recouplant avec une superposition d'environ 60 à 80 %.

L'utilisation de drones permet d'accéder à toutes les zones invisibles du sol. Dans le cas des façades de la cathédrale, des cibles codées ont été fixées et mesurées par télémétrie laser en différents endroits afin de permettre le géoréférencement exact des groupes de photos (**fig. 3**).

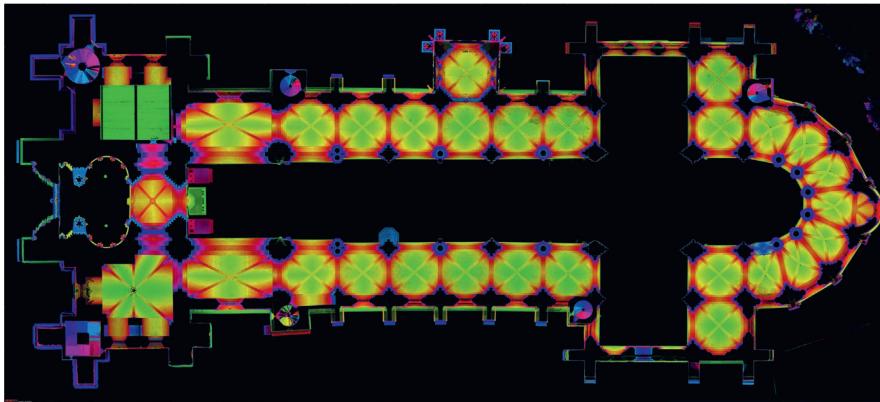
Pour les façades, ce sont plus de trois mille photos qui ont été prises avec un drone de la marque Asctec Falcon équipé d'une caméra Sony Alpha 7R II dotée d'un capteur plein format d'une résolution de 40 millions de pixels (**fig. 7**).

Les photographies sont traitées dans un programme informatique qui permet la détection des points similaires entre toutes les photographies (autocorrélation); on obtient alors l'orientation relative de chaque cliché. Le programme détecte automatiquement des cibles codées et les corrèle avec les coordonnées mesurées, permettant d'obtenir l'orientation absolue du modèle 3D. L'erreur moyenne quadratique obtenue sur l'ensemble des façades est de 6 millimètres (**fig. 6**).

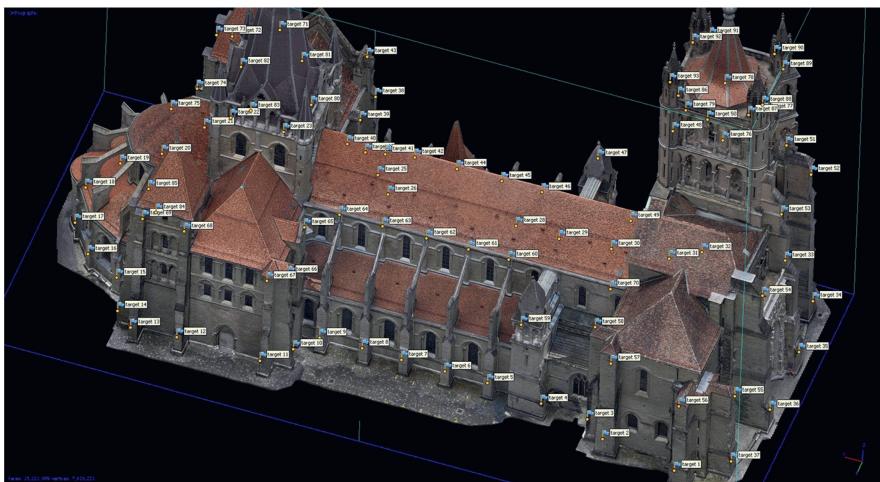
Ensuite, différents algorithmes permettent de générer un nuage de points plus ou moins dense totalisant, pour les façades, plusieurs milliards de points 3D. Ceux-ci sont



4 Le nuage de points peut être coupé et projeté selon n'importe quel plan de l'espace ; ici, la coupe longitudinale de la cathédrale avec, en haut, l'image en intensité de lumière laser et, en bas, l'image colorisée par profondeur des pixels par rapport au plan de coupe par bandes d'un mètre.



5 Orthoplan laser de la vue nadirale du voûtement des bas-côtés et du déambulatoire.



6 Le modèle 3D obtenu par photogrammétrie montrant la position de toutes les cibles utilisées pour l'orientation et la calibration métrique du modèle dans le système de coordonnées de la cathédrale.

colorisés en RGB par une valeur moyenne issue de la position de chaque point 3D dans toutes les photographies le représentant.

Dans une deuxième phase, le nuage est triangulé pour obtenir une surface réglée passant par tous les points et une texture haute définition est générée.

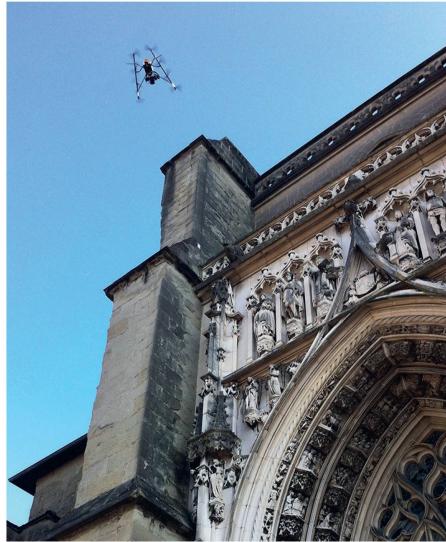
Les orthophotos des façades ont été calculées en projetant de manière orthogonale les pixels 3D, produisant alors des images dont la taille des pixels est de deux millimètres réels (**pl. C1-Orthophotos**).

Ce relevé a été conçu et dirigé par Olivier Feihl avec les participations de Mathias Glaus, Yanick Bourqui, Élise Feihl, Éric Guyomard et Chiara Stefani, tous collaborateurs d'Archéotech SA.

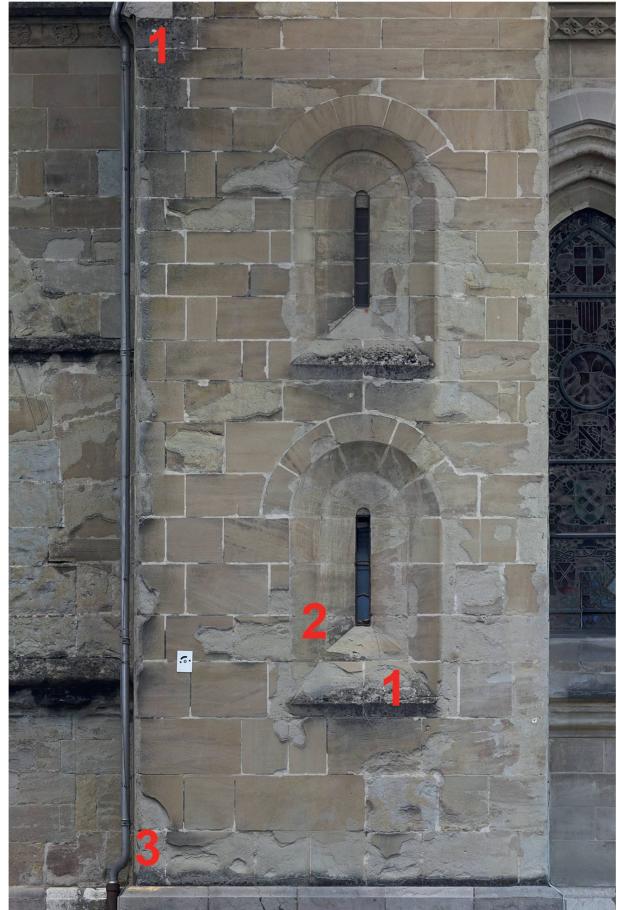
DÉTECTION SEMI-AUTOMATISÉE DES DÉGRADATIONS

L'analyse s'est focalisée sur l'extraction de trois pathologies de dégradation de la pierre, dont la cause est en relation avec l'eau (**fig. 8**):

- Les colonisations biologiques, caractérisées par des plantes et micro-organismes qui affectent les surfaces fortement touchées par l'eau.
- Les croûtes noires et grises, caractérisées par la sulfatation de la pierre liée à la pollution atmosphérique et affectant les zones peu exposées aux pluies battantes et les zones à l'abri de la pluie.
- Les lacunes, désignant une altération profonde de la molasse dans des zones très exposées à la pluie et soumises à l'alternance de périodes humides et sèches.



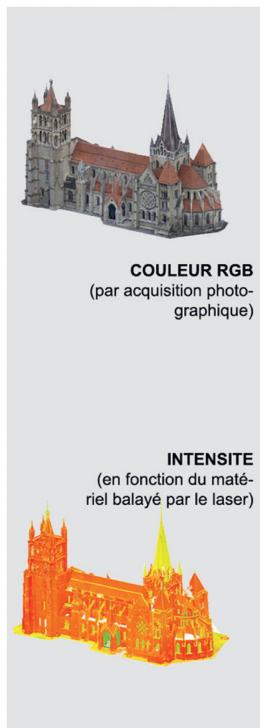
7 Le drone Asotec Falcon durant les prises de vue photogrammétriques du portail occidental. L'avantage du drone est la possibilité d'accéder de face à toutes les parties inaccessibles du sol.



8 Exemples de colonisations biologiques (1), croûtes (2) et lacunes (3) sur la façade sud de la cathédrale.



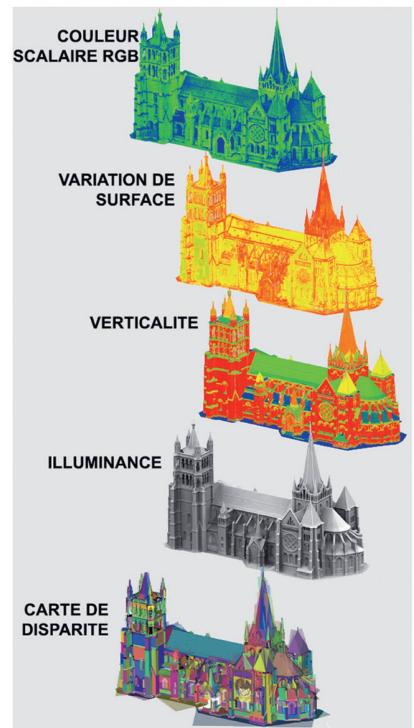
Relevé photogrammétrique par drone



Relevé terrestre avec scanner laser



Nuage de points 3D de la morphologie de la cathédrale



9 Cartographie basée sur les caractéristiques colorimétriques des points du nuage et de leur relation spatiale.

Afin d'utiliser les données 3D dans les domaines de la conservation et restauration, les nuages de points 3D doivent être filtrés de façon pertinente.

Notre démarche a été de créer différentes typologies de cartes en fonction des caractéristiques colorimétriques des points du nuage et de leur relation spatiale, pour déboucher ensuite sur la mise en place de différents modes de visualisation mettant en évidence les dégradations (**fig. 9**). La tridimensionnalité des données permet d'effectuer de nombreuses analyses géométriques grâce à des algorithmes spécifiques présentés ci-dessous.

ANALYSE D'INTENSITÉ

Cette méthode vise à colorier chaque point en fonction du niveau d'intensité de la lumière du laser réfléchie par le matériau balayé. Le scanner laser a une longueur d'onde de 1550 nanomètres. L'intensité permet de lire des variations d'humidité sur une surface, ainsi que les différences de texture, par exemple entre un élément en métal et un élément en pierre (**fig. 10**). Cette analyse s'avère très utile, mais sa limite est que cette valeur d'intensité n'est pas linéaire. L'indice d'intensité dépend du scan, de la distance et de l'angle entre le laser et le point de la surface, ainsi que de la météorologie du jour du relevé (temps sec ou humide).

ANALYSE COLORIMÉTRIQUE (RGB)

Le coloriage des points 3D à partir des photos permet d'obtenir des informations liées à l'aspect visuel. La couleur de la texture peut être accentuée par la création de cartes colorimétriques RGB. À chaque point 3D, une couleur est donc rattachée en fonction de la couleur d'origine de ce point. Les nuances autour du bleu vert permettent de visualiser les colonisations biologiques (**fig. 11**).

ANALYSE DE VARIATION DE SURFACE

Avec cet algorithme, chaque point est coloré avec une valeur en fonction de la distance entre ce point et le plan moyen déterminé par les points voisins. Cette visualisation permet de constater la présence de lacunes (**fig. 12**).

ANALYSE DE VERTICALITÉ

Cette analyse vise à isoler les éléments verticaux de ceux qui ne le sont pas (saillants ou rentrants). Cette information géométrique donne des indices d'ordre topologique et

constitue une aide pour filtrer les colonisations biologiques localisées sur les éléments saillants (**fig. 13**).

ANALYSE D'ILLUMINANCE

Cette analyse colorie chaque point en apportant de la lumière provenant d'une sphère théorique autour de l'objet. L'atténuation de la lumière suivant la concavité ou la convexité des surfaces met en évidence les lacunes, les désagrégations ou les trous de la pierre (**fig. 14**).

ANALYSE PAR CARTE DE DISPARITÉ

Cette analyse se base sur le calcul d'un plan moyennant la surface et ceci est effectué pour chaque surface majeure de la cathédrale. Puis, un algorithme calcule la différence entre le plan moyennant la surface et chaque point du nuage (**fig. 15**). Cette analyse permet de filtrer les lacunes, trous, érosions, ainsi que les désagrégations des croûtes (**fig. 16**).

Une fois toutes les cartes d'analyse chargées sur un même nuage de points, ce dernier est réduit en appliquant les différents filtres d'analyse afin d'isoler chaque pathologie d'altération. Un contrôle manuel est nécessaire dans les éventuelles zones problématiques ou particulièrement complexes.

PHASE DE TEST : ANALYSE DE LA FAÇADE

UEST DU TRANSEPT SUD

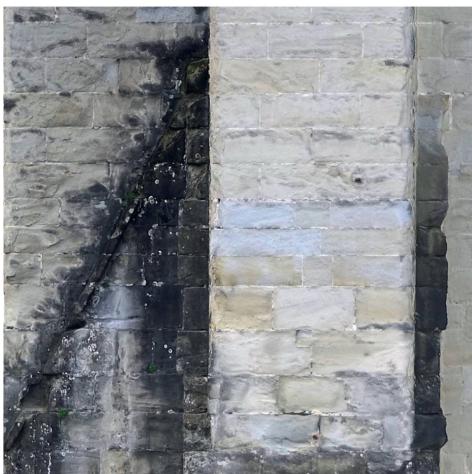
Afin de tester la méthodologie semi-automatique, un premier essai a été effectué sur une petite portion de la cathédrale déjà analysée *in situ* par l'équipe guidée par Fred Girardet. Les résultats ont été concluants et par cette méthodologie, nous avons pu filtrer les trois pathologies de dégradations mentionnées auparavant avec des différences minimales (**fig. 17**).

PATHOLOGIES DE DÉGRADATIONS DE LA CATHÉDRALE DE LAUSANNE

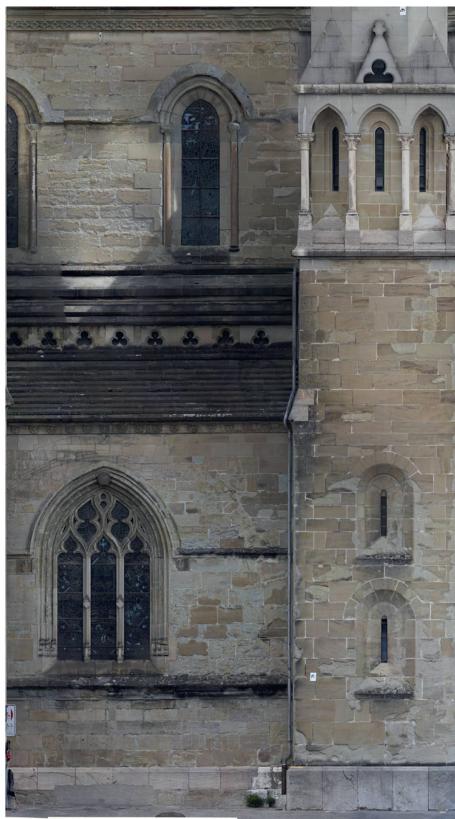
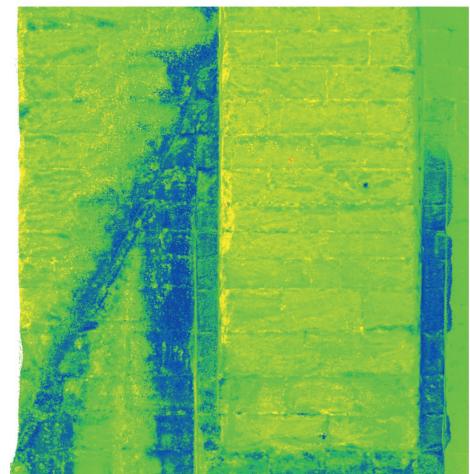
La méthodologie mise en place permet de créer des cartographies préliminaires des altérations. Elles constituent un premier support et pourront être complétées ou corrigées par les experts du domaine au moyen d'observations *in situ*.



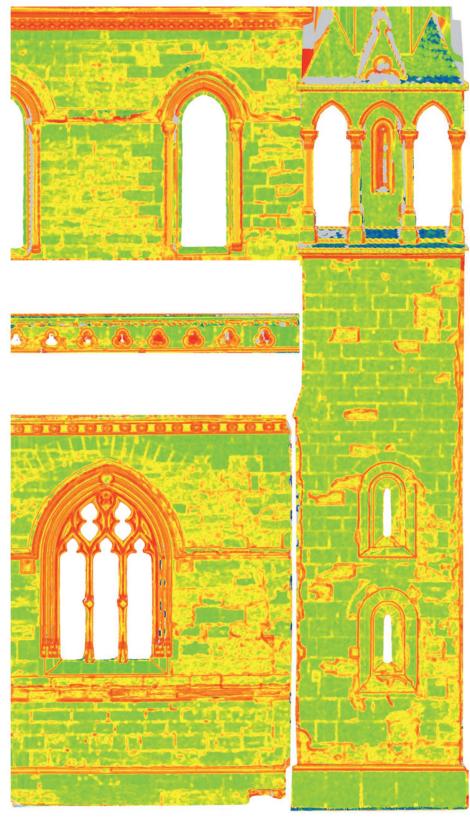
10 Détail de la Tour inachevée. Comparaison entre la carte d'intensité générée à partir du nuage de points (à droite) et l'orthophotographie extraite à partir du modèle 3D texturé (à gauche). Le modèle montre que les colonisations biologiques et les croûtes noires tendent vers le jaune intense.

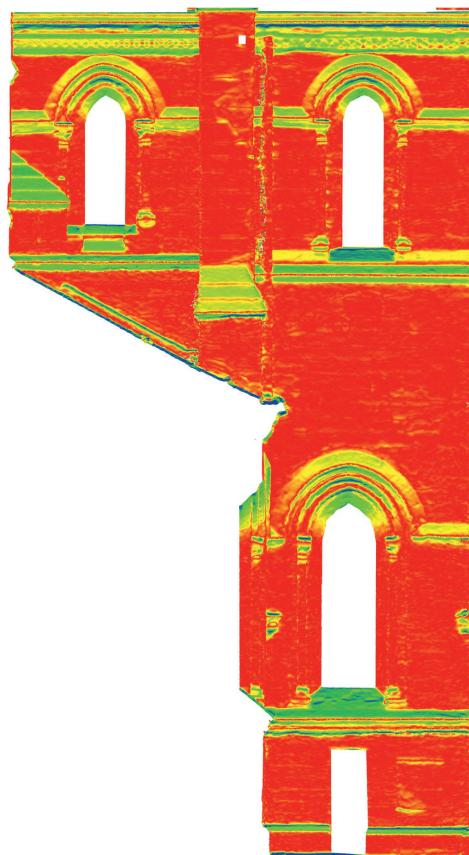


11 Détail de la Tour inachevée. Visualisation des colonisations biologiques en bleu vert foncé.

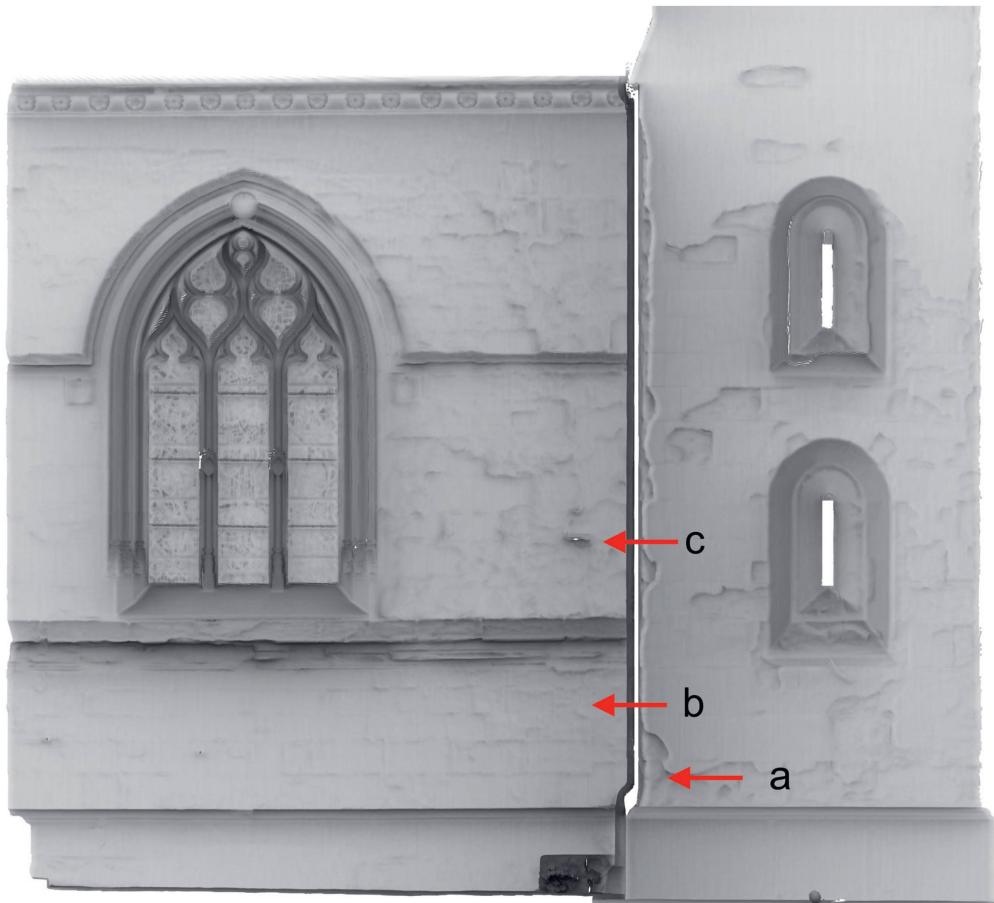


12 Façade sud: orthophotographie à gauche et carte de variation de surface à droite. Cette dernière montre les plaques décollées ainsi que les désagrégations et les traces des anciennes restaurations.

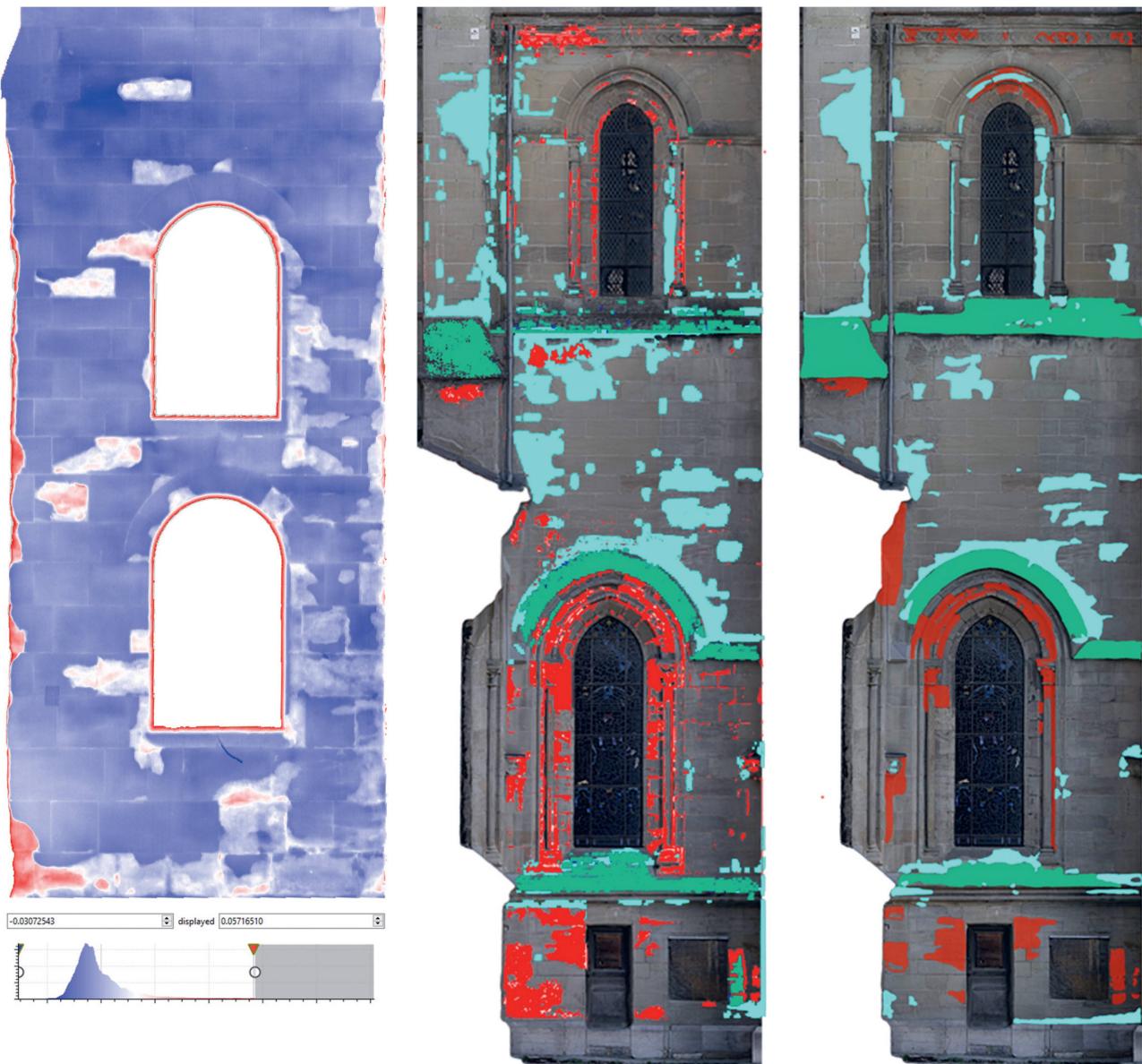




13 Façade ouest du transept sud: orthophotographie à gauche et carte de verticalité à droite.



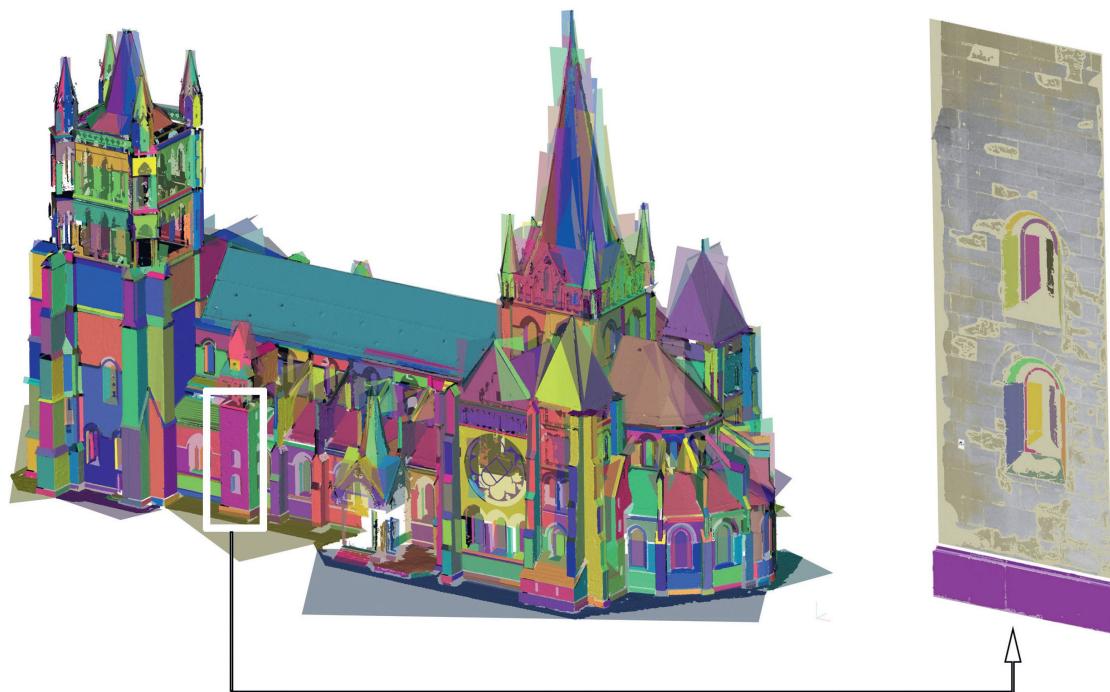
14 Détail d'un parement de la façade sud. Observation en fonction de la granularité de la pierre: a) lacunes, b) désagrégations et c) trous.



█ colonisation biologique
█ croûte
█ lacune

16 Exemple de carte de disparité de la tour de la façade sud. Afin d'isoler les lacunes et les différencier des légères érosions, nous avons convenu de sélectionner seulement les points dont la déviation est supérieure ou égale à 1 cm.

17 Comparaison entre l'analyse semi-automatique (gauche) et l'analyse effectuée par Rino Sàrl (Girardet F.) avec observation in situ (droite).



15 Analyse par carte de disparité: calcul des plans moyennant la surface de la cathédrale.

Cette analyse a permis d'obtenir une cartographie des parements de molasse des quatre façades principales de la cathédrale. Dans ce cas, il était convenu de reporter les informations concernant les trois altérations sous forme d'images raster avec une résolution de 1 pixel/5 mm. Cette résolution est le résultat du compromis entre la résolution moyenne du nuage de points issus du vol du drone et du balayage laser.

Ces images montrent l'étendue des dégâts liés à la pluie battante grâce à trois pathologies en lien étroit avec l'eau (**pl. C2 et C3–Pathologies**). Des zones «douteuses» ont été indiquées en bleu foncé: il s'agit de zones pour lesquelles il est impossible d'évaluer, à partir des données à disposition, si un aspect relève ou pas d'une dégradation. Ces portions, même si peu nombreuses, nécessiteront dans le futur des observations in situ pour définir le type de pathologie.

CONCLUSION

Ce travail d'analyse a permis de valider une méthodologie nouvelle et innovante qui offre une vision du monument dans sa globalité et peut constituer un support à l'analyse des pathologies de dégradation de la pierre.

D'une part, l'analyse numérique constitue un support préalable à l'analyse in situ. Ce support devient complémentaire à l'observation et permet de cibler les secteurs d'intervention en amont de la restauration. D'autre part, la mesure numérique permet d'effectuer un monitorage au fil du temps. Ceci est possible grâce à l'utilisation d'un seul et unique système de référence géométrique, qui permet d'injecter les données (collectées à divers moments temporels) dans le même espace et à la même échelle. Cet aspect ouvre les portes à un archivage numérique qui garantit la pérennité des données.

Enfin, l'analyse digitale des pathologies permet de quantifier les dégradations, de passer des données qualitatives à des données quantitatives. Quantifier les dégradations permet par exemple d'avoir une estimation des coûts dus au remplacement des pierres, à l'application de produits pour nettoyer les patines ou au temps dédié au nettoyage des croûtes noires.