Zeitschrift: Monuments vaudois. Hors-série

Herausgeber: Association Edimento - pour le patrimoine

Band: 2 (2021)

Artikel: Mesures des mouvements d'eau à la cathédrale de Lausanne et réflexions sur leur rôle dans la dégradation de la pierre

Autor: Praticò, Ylenia / Girardet, Fred / Scherer, George W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1053473

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: 15.07.2025

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

Mesures des mouvements d'eau à la cathédrale de Lausanne et réflexions sur leur rôle dans la dégradation de la pierre

Ylenia Praticò [1], Fred Girardet [2], George W. Scherer [3] et Robert J. Flatt [1*]

[1] Physical Chemistry of Building Materials, EPFZ

[2] Rino Sàrl, Blonay

[3] Princeton University, USA

La dégradation de la pierre est un processus complexe impliquant plusieurs mécanismes possibles qui relient les échelles de longueur depuis le niveau moléculaire, en passant par la microstructure et jusqu'à l'échelle macroscopique. Cependant, l'eau joue toujours un rôle, même si ce n'est pas toujours le même. Ainsi, la répartition de l'eau sur un monument à cause de la pluie, son accumulation et sa distribution dans les pierres représentent des éléments d'information important quant à la dégradation de la pierre.

Un objectif de cet article est donc de discuter des mesures récentes de la distribution d'eau à la cathédrale de Lausanne. En particulier, les résultats de mesures de pluie battante sont présentés par rapport à l'orientation sur le bâtiment. En complément, nous analysons la distribution de l'eau dans la pierre. Ces résultats apportent des preuves expérimentales de l'accumulation d'eau liquide dans la profondeur de la pierre et démontrent l'apparition d'une zone de forte saturation en eau à quelques centimètres sous la surface extérieure.

Ces observations sont liées aux principaux mécanismes de dégradation qui peuvent affecter un monument. Un accent est mis sur l'état actuel de la pierre et en particulier l'héritage de la période de forte pollution atmosphérique du siècle passé. Cela a laissé des zones à forte teneur en gypse, produit ultime de la réaction entre le SO_2 atmosphérique et la matrice calcaire de la molasse.

En dehors de cela, nous offrons un bref aperçu des autres mécanismes de dégradation causés par les dommages engendrés par le gel, les argiles et les sels. Tous ces éléments nécessitent impérativement la présence d'eau, mais pour des raisons différentes et en quantités différentes. Cependant, quelle que soit la situation, connaître la distribution de l'eau sur un monument représente un outil nécessaire à la compréhension des mécanismes d'altération et à l'adéquation des stratégies de conservation simples et – nous l'espérons – efficaces.

MÉCANISMES DE DÉGRADATION

CRISTALLISATION DES SELS

La cristallisation des sels est considérée comme l'un des principaux vecteurs de la dégradation des monuments en pierre[1]. Il a été démontré qu'elle implique un phénomène de pression de cristallisation [2], qui engendre des contraintes en traction qui sont particulièrement néfastes étant donné que les pierres d'ouvrage ont une résistance très basse en traction [3].

À Lausanne, le sel le plus présent est le gypse, un sulfate de calcium dihydrate formé in situ comme résultat de la pollution atmosphérique passée. D'un point de vue théorique,

les pressions que peut générer ce minéral vont dépendre des mouvements d'eau à l'intérieur de la pierre[4]. À la cathédrale, on trouve des quantités importantes de gypse dans la couche de matériaux pulvérulents sous les plaques[5], ce qui suggère un rôle du gypse dans la formation de ces plaques.

GEL/DÉGEL

Le gel de l'eau dans les matériaux poreux peut causer des dommages selon différents mécanismes[6]. Le premier, et le plus dramatique, est appelé « eau piégée ». Cependant, de telles situations sont rares sur des monuments, à l'exception d'éléments décoratifs fins préalablement saturés d'eau.

Une autre situation, potentiellement plus vraisemblable à Lausanne, est appelée « pression hydraulique »[7]. Pour les molasses suisses, on ne s'attend à des pressions importantes que si ces mêmes pierres sont saturées en eau et que la vitesse de refroidissement est rapide.

GONFLEMENT ET RETRAIT DES ARGILES

Les grès suisses sont souvent caractérisés par une expansion/contraction prononcée dans les conditions de mouillage/séchage, en raison de la forte teneur en argiles de la matrice de la pierre[8]. En phase d'humidification, les molécules d'eau s'infiltrent dans la structure en couches de certaines argiles, ce qui cause un écartement communément appelé « gonflement intracristallin »[9]. Ce phénomène génère des changements dimensionnels dans la pierre et se traduit par un développement de pressions internes[10]. Ce mécanisme joue un rôle particulièrement important dans l'altération des façades des bâtiments, et en particulier dans le développement de desquamations en plaques[11].

POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET ALTÉRATION DE LA MOLASSE

Dans la deuxième moitié du XXe siècle, l'impact de la pollution atmosphérique sur le patrimoine bâti était préoccupant[12]. Les études conduites au cours des années huitante ont mis en évidence le rôle particulier du dioxyde de soufre. En effet, son oxydation en anhydrite sulfurique donne, en présence d'eau, de l'acide sulfurique qui attaque fortement toute pierre à liant calcaire, telle que la molasse[13].

Différentes études, en particulier les campagnes de mesures du Laboratoire de conservation de la pierre de l'EPFL (LCP) menées en Suisse et en Europe, ont permis

1 *Colonne, sud-ouest de la cathédrale.*

de mieux comprendre les mécanismes associés ainsi que leur dépendance aux conditions d'exposition. Par exemple, dans des zones abritées de la pluie **(fig. 1)**, on a mesuré une accumulation de quantités importantes de gypse ($CaSO_4$ $2H_2O$), dont il a été montré que la formation résultait d'une réaction de l'anhydride sulfureux (SO_2) atmosphérique avec les grès calcareux (molasse) et les calcaires, et non d'apports aréolaires ou véhiculés par la pluie (pluies acides)[14]. En zones exposées à la pluie, on observe une érosion pouvant atteindre quelques millimètres, selon un mécanisme détaillé dans une des sous-sections à suivre. Dans des zones abritées ou peu exposées, on observe la formation de croûtes noires riches en gypse[15].

Les altérations profondes de la molasse se sont formées dans des emplacements très exposés aux pluies battantes, se caractérisant, comme précédemment mentionné, par une érosion superficielle. Cependant, toutes les zones exposées n'ont pas montré ce même comportement. En effet, en certains endroits, on observe la formation de plaques dont la surface peut paraître saine. Toutefois, une auscultation

2 *L'enlèvement d'un bloc destiné à être remplacé laisse apparaître, sur la tranche des blocs périphériques, une déstructuration de 2 à 3 cm formée sous les plaques.*

réalisée par résonance (tapotement) révèle la genèse de décollements (boursouflures). Par exemple, dans le croisillon sud, l'enlèvement de blocs, destinés à être remplacés a permis d'observer sur la tranche des blocs voisins, sous les plaques apparemment saines, une déstructuration de 2 à 3 cm, pouvant atteindre 12 cm dans les angles **(fig. 2)**.

IMPLICATIONS DE L'IMPORTANCE DES MOUVEMENTS D'EAU

Les mécanismes décrits ci-dessus font tous intervenir l'eau d'une manière ou d'une autre. Pour ce qui est du gel et dégel, plus la profondeur de saturation en eau de la porosité est grande, plus haut est le risque de dégâts par le gel. Ce risque dépend également des températures atteintes dans la pierre, mais aussi de la vitesse de refroidissement. Dans ce contexte, il faut aussi tenir en compte des conditions climatiques plus froides pendant les siècles passés, avec des périodes de gel probablement plus fréquentes et plus longues.

Le second mécanisme impliquant l'eau très directement concerne le gonflement des argiles. Ici, le facteur principal concerne des cycles d'humidification et de séchage. Des situations très différentes sont attendues selon que les pierres sont saturées ou sèches en leur cœur[16]. De plus, au vu de résultats récents, il apparaît qu'une saturation soutenue de la pierre pourrait engendrer une dégradation lente par un procédé analogue à une corrosion sous contrainte (causée ici par la propension à l'expansion des argiles)[17].

La situation suivante concerne l'attaque passée par le SO_2 atmosphérique et ces conséquences à long terme. Ici, l'eau a été à la fois un solvant et un réactif permettant la formation du gypse[18]. Une fois formé ce minéral a tendance à se dissoudre en présence d'eau et à migrer vers l'intérieur de la pierre. En effet la quantité de gypse trouvée dans des pierres exposées ou non à la pluie est identique, mais sa distribution est différente[19].

Étant donné ce rôle prépondérant de l'eau, il nous est apparu utile d'en caractériser la distribution à la cathédrale de Lausanne par une campagne de mesure, dont les résultats essentiels sont décrits ci-après.

COMPORTEMENT SOUS PLUIE

RELEVÉS PHOTOGRAPHIQUES

L'eau jouant un rôle majeur dans l'altération de la pierre, il convient d'en comprendre la distribution sur un monument en période de pluie. Il est donc particulièrement utile d'augmenter toute documentation photographique par des images prises sous pluie.

Une illustration d'une telle documentation est donnée dans la **figure 3** dont la différence entre les deux images permet clairement de déterminer les zones plus humides. Ce type de documentation permet aussi par exemple de localiser les dysfonctionnements des éléments architecturaux chargés d'éloigner l'eau de la façade tels que gouttières, larmiers, joints, gargouilles **(fig. 4, gauche)**.

PLUIE BATTANTE

Dispositif de mesures

La quantification directe des quantités de pluie battante à un nombre limité d'endroits stratégiques est cruciale pour

3 *À gauche, situation fréquente d'exposition à une pluie verticale avec un faible vent. Les fonds de façade, contreforts et arcs-boutants (à l'exception de leurs culées) ne sont pas touchés. Cette situation permet d'observer l'efficacité des systèmes architecturaux mis en place pour éloigner l'eau des façades. À droite, situation de pluies battantes (vent 8-20 km/h de sud-sud-ouest) mettant en évidence la diversité des zones touchées (flèches vertes), l'importance de l'impact sur les arcs-boutants et entre autres la particularité des plaques demeurées en place qui se mouillent davantage que les dépressions de 2 à 3 cm laissées par la chute d'une plaque.*

4 *Photographies prises sous pluie. À gauche : mise en évidence d'infiltrations d'eau ressortant dans les joints de façade provenant probablement des joints du glacis de toiture. Observation en conditions de pluie verticale de faible intensité. À droite : les plaques déjà vulnérables semblent les plus exposées à la pluie. Observation réalisée en conditions de précipitation verticale de faible intensité.*

la caractérisation de l'exposition à la pluie dans différentes orientations. En particulier, des mesures directes de la pluie battante peuvent s'avérer indispensables pour caractériser des situations manifestement distinctes, comme peuvent l'être les orientations cardinales. Pour mieux étudier ce problème, un équipement spécial a été développé [20].

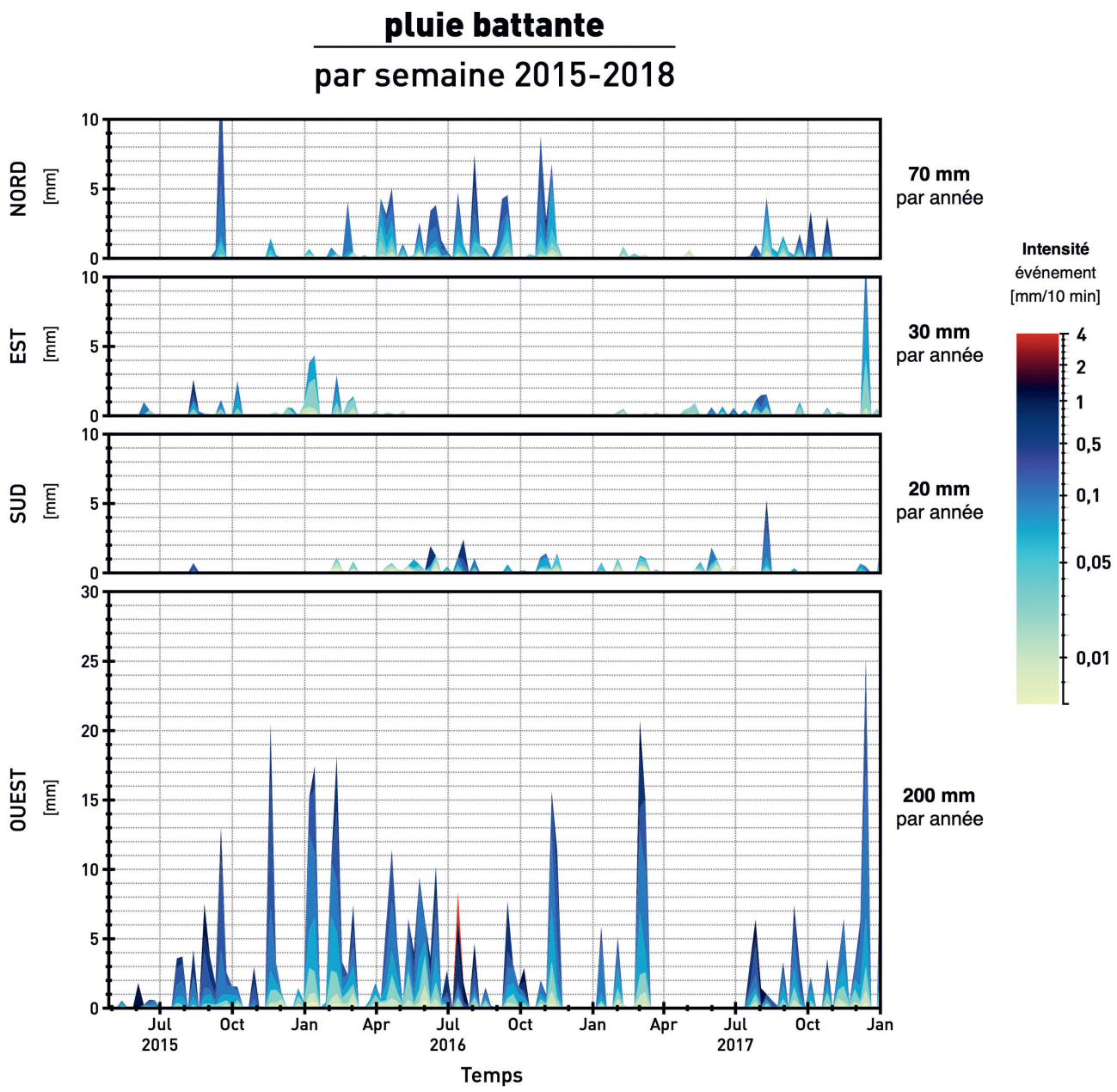
Relevés météorologiques

Les mesures de pluie mettent en évidence les différences entre orientations cardinales **(fig. 5)**. Les façades orientées à l'ouest reçoivent la plus grande quantité d'eau par an ainsi que les pluies les plus intenses. Cela semble cohérent avec l'observation de formes sévères de dégradation sur les façades orientées à l'ouest. D'autre part, la quantité limitée d'eau enregistrée sur les façades sud (dix fois moins que sur les façades ouest) suggère que la gravité de la dégradation n'est pas proportionnelle à la quantité d'eau reçue, et pourrait plutôt être liée à l'apparition de conditions critiques.

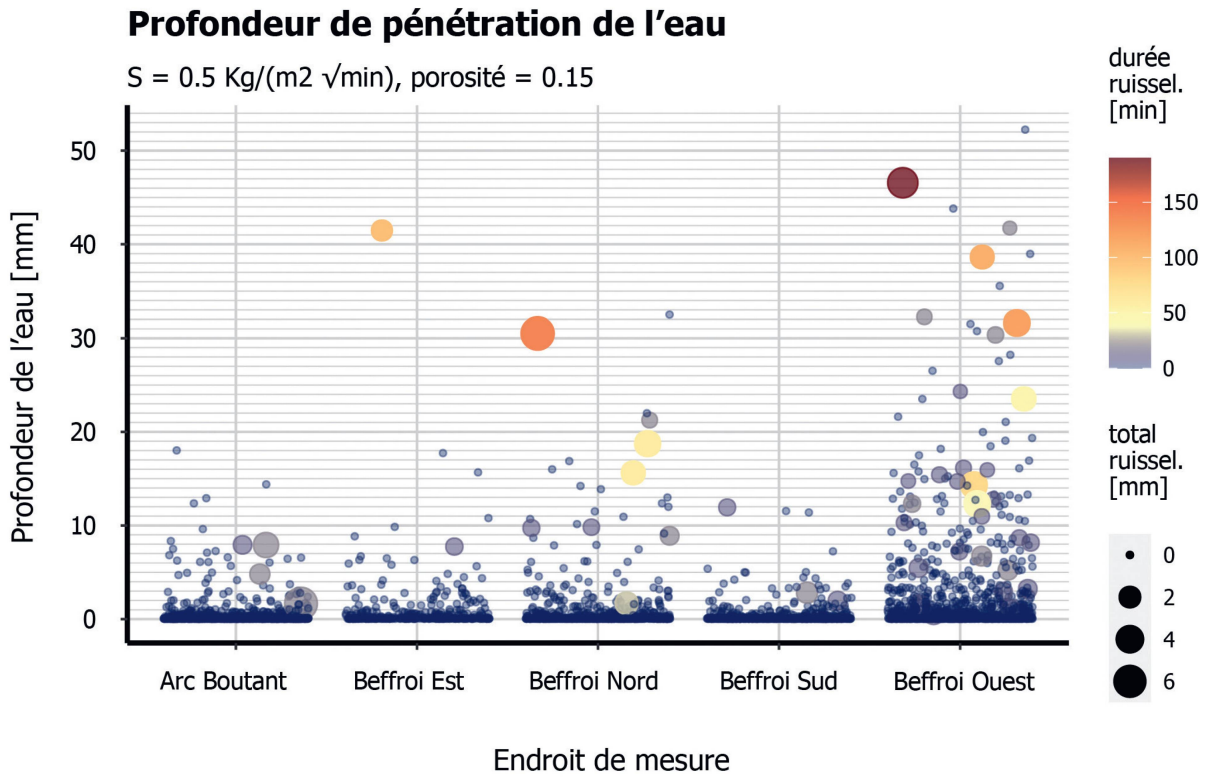
Profondeur atteinte par la pluie battante

Chaque type de pierre a une certaine capacité à absorber l'eau par capillarité. La vitesse relative de cette capacité d'absorption par rapport à la pluie battante détermine si l'on a absorption complète ou ruissellement [21]. Partant de là, Praticò a déterminé la profondeur de pénétration d'eau à la cathédrale **(fig. 6)** [22].

Ses mesures montrent que, sur une période de plus de trois ans, très peu d'événements de pluie sont capables de provoquer une pénétration d'eau supérieure à 4 cm (profondeur typique de formation des plaques). Cela confirme l'hypothèse selon laquelle un nombre limité de situations pluvieuses critiques pourraient être à l'origine de la majeure partie de la dégradation par formation de plaques.



5 *Mesures de pluie battante sur le beffroi de la cathédrale de Lausanne. L'aire de la courbe indique la quantité totale d'eau reçue par la façade. Les couleurs indiquent le type de pluie qui conduit à cette accumulation d'eau (du vert clair pour les pluies légères au rouge pour les pluies intenses).*



6 *Profondeur de pénétration de l'eau pour l'arc-boutant et les quatre orientations cardinales au beffroi. La superficie des points est une indication de la quantité totale d'eau ruisselante pour chaque événement pluvieux. Le gradient de couleur indique la durée du ruissellement. Les données ont été enregistrées sur une période de trois ans entre 2016 et 2019.*

MONITORING GÉNÉRAL DES SURFACES DE LA CATHÉDRALE EN RELATION AVEC L'EAU

Il demeure sur la molasse de la cathédrale des indicateurs (proxy) permettant dans une certaine mesure de quantifier l'impact exercé par la pluie sur la molasse. L'identification de ces traces constitue la base du travail proposé par Archéotech SA pour une localisation semi-automatique des dégradations.

Trois types d'altérations typiques compatibles avec les techniques mises en œuvre ont été retenues, soit :

- Non exposée à la pluie. Dans des zones caractérisées par la présence de croûtes noires, riches en gypse **(fig. 7, gauche)**.
- Humides. Dans ce cas, les surfaces noires présentent une colonisation biologique noire, nécessitant une humidification fréquente **(fig. 7, centre)**.
- Altérations liées à l'eau. Dans ces cas, on observe une perte de matière significative liée à la chute d'une plaque, par exemple **(fig. 7, droite)**.

Rappelons que les croûtes noires se sont formées lorsque la teneur atmosphérique en SO_2 était élevée, elles ne peuvent exister que sur des éléments anciens, cette altération ne se développant plus. À l'inverse, la croissance « biologique » ne progresse rapidement que depuis la forte diminution de la pollution atmosphérique (SO_2).

MESURES DANS LA PIERRE

La mesure de la présence d'eau dans la profondeur est essentielle pour comprendre les mouvements d'eau dans la pierre et leur relation avec les sollicitations environnementales de la façade. Des études antérieures ont utilisé des mesures d'humidité relative comme indication de la teneur en eau dans la porosité de la pierre [23]. Les mesures présentées ci-dessous sont plus novatrices, car elles donnent le gradient d'eau liquide dans la profondeur de la pierre grâce à des mesures d'impédance **(fig. 8)** [24].

7 *Illustration photographique reportant en couleurs les zones suivantes : à gauche : non exposées à la pluie (croûte noire) ; au centre : zone humide (apparence noire due à une activité biologique) ; à droite : altérations liées à l'eau (perte de matière, plaques et décollements). Image reportée sur le relevé d'Archéotech SA (REF 350-10-1).*

Un exemple de relevés à la **figure 8**, montre les mesures obtenues entre 2016 et 2020 sur la croisée du transept sud. L'impédance (en haut à gauche) fournit une mesure des quantités d'eau (une impédance plus faible signifie des quantités d'eau liquide plus élevées). La zone grise indique qu'au moins 50 % de la porosité de la pierre est remplie d'eau liquide.

L'une des informations les plus importantes est la présence constante d'eau liquide dans les blocs de pierre tout au long de l'année. Il s'agit là d'une observation inédite et qui confirme la pertinence de l'étude de l'accumulation d'eau pour la compréhension des processus de dégradation. Des quantités d'eau de cette importance auraient en effet des conséquences majeures à la fois sur le transport des sels et sur le risque de dégâts liés au gel [25].

Ces résultats montrent également une accumulation prononcée d'eau liquide à environ 6 cm de profondeur, en particulier pendant les mois d'hiver. Cette profondeur est compatible avec la formation des plaques, et suggère qu'un mouillage prolongé (et sa conséquence, l'affaiblissement du substrat carbonaté [26]) pourrait jouer un rôle dans la formation initiale des plaques [27], tout comme la cristallisation de sel [28] et les dommages causés par le gel [29].

La **figure 9** présente un résumé des profils de distribution de l'eau détectés, ainsi qu'un mécanisme possible d'accumulation d'eau.

PERSPECTIVES

La relation entre le mouvement de l'eau et le développement des dégâts à la cathédrale de Lausanne a été supputée depuis longtemps. Pour la première fois, les mesures présentées dans cette étude offrent une mesure directe et quantitative de l'exposition à l'eau et de son absorption à différentes orientations de la façade.

Les mesures directes de la pluie battante ont confirmé que les dommages les plus graves sont bien sûr constatés dans

les zones exposées à la pluie battante, mais que les détériorations ne sont pas proportionnelles à la quantité d'eau totale reçue pendant une année. Cela confirme les spéculations selon lesquelles la détérioration de la pierre est plutôt liée à un nombre limité d'événements critiques [30].

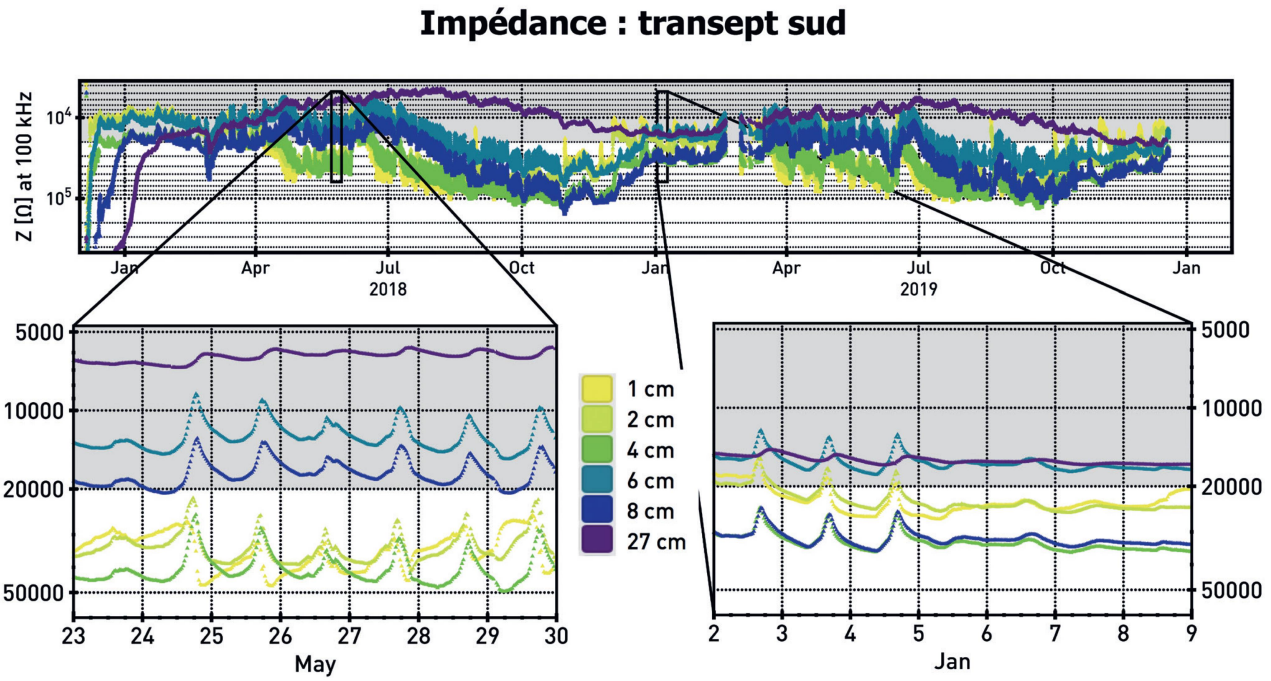
L'analyse de l'exposition à la pluie a également montré que le ruissellement se produit rarement sur les molasses à Lausanne. Cela implique que les sulfates formés à la surface ne sont pas lessivés et que les quantités élevées d'eau absorbées peuvent entraîner le transport du gypse dans la profondeur de la pierre.

Cela expliquerait également l'accumulation de sulfates jusqu'à quelques centimètres de profondeur, détectée lors d'études précédentes sur la molasse de différents monuments suisses [31].

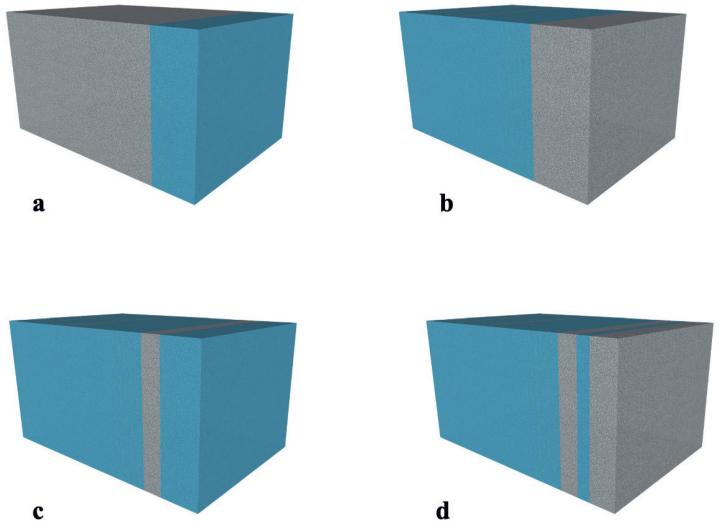
Des mesures d'impédance ont révélé deux informations importantes. La première est que l'eau liquide s'accumule dans la profondeur du noyau des blocs de pierre et remplit plus de 50 % de la porosité pendant toute l'année. La seconde est que pendant les mois d'hiver, l'eau s'accumule à une profondeur d'environ 6 cm. Cette profondeur correspond plus ou moins à celle de la formation des plaques et laisse penser que le gel pourrait causer l'apparition des microfissures, propagées ensuite par le gonflement des argiles pour former des plaques. Il est par contre aussi possible que cette zone humide favorise des cycles de dissolution et cristallisation du gypse, offrant une autre explication à la microfissuration initiale.

La pleine compréhension de la répartition inattendue de la distribution d'humidité observée a des implications de grande portée pour la conservation de la cathédrale de Lausanne, ainsi que d'autres monuments suisses. Ces résultats invitent clairement à une surveillance plus large des monuments pour comprendre le rôle que l'eau peut jouer dans la dégradation de la pierre. Ce genre de mesures, associé à des observations régulières pendant les épisodes de pluie, peut jouer un rôle crucial dans la mise au point de moyens de contrôle efficaces de l'eau.

En termes de mécanisme de dégradation, il apparaît que la situation environnementale s'est améliorée (moins de gel et de pollution). Ceci est particulièrement bénéfique pour la molasse récemment mise en place. Par contre, les pierres plus anciennes portent les marques des stress environnementaux passés et restent plus dommageables. Dans ce contexte, il faut considérer que les argiles peuvent causer la poursuite de la dégradation initiée aux siècles passés. Ces phénomènes méritent une étude plus approfondie et l'instrumentation développée dans le contexte de notre étude peut grandement y contribuer [32]. Avec de tels outils, les conséquences des changements climatiques à venir [33], notamment des orages plus intenses, suivis de séchages plus rapides du fait des températures plus élevées, pourraient également être étudiées.



8 *Mesure d'impédance au niveau du transept sud, avec détail du gradient de signal sur toute la profondeur au printemps-été (en bas à gauche) et en hiver (en bas à droite).*



9 *Schéma des différents types de distribution de l'eau dans un bloc de pierre en façade. a : une pierre initialement sèche absorbe l'eau lors des événements de pluie. b : après des périodes de pluie répétées, en combinaison avec des gradients de température, l'eau est entraînée dans la profondeur de la pierre. c : les pluies suivantes saturent la façade. d : après un séchage partiel de la surface, l'eau s'accumule à une profondeur caractéristique*[28].

REMERCIEMENTS

Le financement de la thèse d'Ylenia Praticò a été soutenu en partie par la fondation Stiftung zur Förderung der Denkmalpflege. Les auteurs remercient Archéotech SA pour l'image présentée à la figure 7. Ils remercient également la Commission technique de la cathédrale pour son soutien à ce projet, rendant en particulier possible l'installation des capteurs de mesures présentés dans cet article.

NOTES

1 Andrew Goudie & Heather Viles, *Salt Weathering Hazard*, Chichester 1997.

2 Carl W. Correns, « Growth and dissolution of crystals under linear pressure », in *Discussions of the Faraday Society* 5, 1949, pp. 267-271 ; George W. Scherer, « Crystallization in pores », in *Cement and Concrete Research* 29, 1999, 8, pp. 1347-1358 ; Michael Steiger, « Crystal growth in porous materials, I : The crystallization pressure of large crystals », in *Journal of Crystal Growth* 282, 2005, 3-4, pp. 455-469.

3 Scherer 1999 (cf. note 2) ; Robert J. Flatt *et al.*, « Chemomechanics of salt damage in stone », in *Nature Communications* 5, 2014.

4 A. Elena Charola, Josef Pühringer & Michael Steiger, « Gypsum : a review of its role in the deterioration of building materials », in *Environmental Geology* 52, 2007, 2, pp. 339-352.

5 Fred Girardet, *Lausanne, cathédrale, croisillon sud du transept. Investigations, conseils et développements*, Blonay 2020 ; Konrad Zehnder, « Weathering of molasse sandstones on monuments and natural outcrops », in *La détérioration et la préservation de la pierre : actes du 3e Congrès international*, Padoue 1979, pp. 91-105.

6 George W. Scherer & John J. Valenza, « Mechanisms of frost damage », in Francis Young & Jan P. Skalny (éd.), *Materials Science of Concrete*, vol. 7, American Ceramic Society, 2005, pp. 209-246.

7 Maxim Deprez *et al.*, « A review on freeze-thaw action and weathering of rocks », in *Earth-Science Reviews* 203, 2020.

8 Claude Félix, *Molasses et grès de Villarlod (Fribourg)*, Lausanne 1977 ; Christine Bläuer, *Verwitterung der Berner Sandsteine*, Berne 1987 ; Bénédicte Rousset, « La molasse grise de Lausanne », in *Déontologie de la pierre : stratégies d'intervention pour la cathédrale de Lausanne*, Lausanne 2013 *(Monuments vaudois* hors-série 1), p. 144.

9 Timothy Wangler & George W. Scherer, « Clay swelling mechanism in clay-bearing sandstones », in *Environmental Geology* 56, 2008, pp. 529-534.

10 George W. Scherer & Inmaculada Jiménez González, « Characterization of swelling in clay-bearing stone », in *Special Paper of the Geological Society of America* 390, 2005, pp. 51-61.

11 Mathilde Tiennot, *Influence des propriétés physico-mécaniques des minéraux argileux dans l'altération de la pierre monumentale*, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017.

12 Andreas Arnold, Konrad Zehnder, « Salt weathering on monuments », in Fulvio Zezza, *La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo*, Brescia 1990, pp. 31-58.

13 Dario Camuffo, Marco Del Monte & Cristina Sabbioni, « Origin and growth mechanisms of the sulfated crusts on urban limestone », in *Water, Air, and Soil Pollution* 19, 1983, pp. 351-359.

14 Roger-Alexandre Lefèvre & Patrick Ausset, « Les effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux du patrimoine bâti : la pierre et le verre », in *Pollution atmosphérique* 172, 2001, pp. 571-588 ; Robert J. Flatt, Fred Girardet & Jean-Louis Crovisier, « Modelling of sulphur dioxide deposition on the Bern sandstone », in Renato Pancella (éd.), *Conservation et restauration des biens culturels*, Lausanne 1995, pp. 401-408.

15 Girardet 2020 ; Zehnder 1979 (cf. note 5) ; Jean-Pierre Pauly, *Altération de la pierre en œuvre en relation avec la climatologie et l'architecture. Simulation et produits de protection*, thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 1990.

16 Scherer & Jiménez González 2005 (cf. note 10).

17 Timothy P. Wangler & Asel Maria Aguilar Sanchez, « Potential damage mechanisms in Swiss molasse », in Siegfried Siegesmund & Bernhard Middendorf (dir.), *Monument Future : Decay and Conservation of Stone*, Halle 2020, pp. 501-506.

18 Charola, Pühringer & Steiger 2007 (cf. note 4).

19 Girardet 2020 (cf. note 5).

20 Ylenia Praticò, *Practical application of science for the conservation of built heritage : strategies based on the analysis of critical events,* thèse de doctorat, EPFZ, 2020.

21 Christopher Hall & William D. Hoff, *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*, New York 2011.

22 Praticò 2020 (cf. note 20).

23 Thibault Demoulin, *Durability of clay-bearing sandstone and its repair by viscoelastic mortars*, thèse de doctorat, EPFZ, 2016.

24 Praticò 2020 (cf. note 20).

25 Bernard J. Smith *et al.*, « A commentary on climate change, stone decay dynamics and the ‹ greening › of natural stone buildings : new perspectives on ‹ deep wetting › », in *Environmental Earth Sciences* 63, 2011, pp. 1691–1700.

26 Wangler & Aguilar Sanchez 2020 (cf. note 17).

27 Ylenia Praticò, Robert J. Flatt & Fred Girardet, « New insights on the causes of contour scaling in Swiss sandstones », in Siegesmund & Middendorf 2020 (cf. note 17), pp. 385-390 ; Rolf Snethlage & Eberhard Wendler, « Moisture cycles and sandstone degradation », in Norbert S. Baer & Rolf Snethlage, *Saving our architectural heritage. The conservation of historic stones structures*, Chichester/New York 1997, pp. 7-24.

28 Flatt *et al.* 2014 (cf. note 3) ; Charola, Pühringer & Steiger 2007 (cf. note 4).

29 Scherer & Valenza 2005 (cf. note 6).

30 Ylenia Praticò, Fred Girardet & Robert J. Flatt, « Strategies for the conservation of built heritage based on the analysis of rare events », in John J. Hughes & Torsten Howind (éd.), *Science and Art : A Future for Stone, Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, Paisley 2016, pp. 459-466.

31 Zehnder 1979 (cf. note 5).

32 Praticò 2020 (cf. note 20).

33 Smith *et al.* 2011 (cf. note 25) ; Christopher Hall *et al.*, « Moisture dynamics in walls : response to micro-environment and climate change », in *Proceedings of the Royal Society* A 467, 2011, pp. 194–211.