

**Preserving Identity**

**11th Forum for the Conservation and  
Technology of Historic Stained Glass  
Girona – Barcelona, 7–9 July 2022**

**Organized by the Catalan Committee  
of the Corpus Vitrearum  
in Association with the  
International Scientific Committee for the  
Conservation of Stained Glass (ISCCSG)**

Publicat amb el suport de / Book sponsored by:



**Generalitat de Catalunya  
Departament de Cultura**



**Diputació de Girona**

## Scientific Committee

### Institut d'Estudis Catalans

Xavier Barral i Altet  
Rafael Cornudella  
Francesc Fontbona  
Ramon Pinyol i Torrents

### Corpus Vitrearum International, Members of the Board

Tim Ayers  
Dobrosława Horzela  
Ellen Shortell  
Karine Boulanger  
Hartmut Scholz  
Isabelle Lecocq

### International Scientific Committee for the Conservation of Stained Glass, Members of the Board:

Ivo Rauch  
Sarah Brown  
Aletta Rambaut

### Presidents of the National Committees

Wojciech Bałus  
Xavier Barral i Altet  
Jean Blanchaert  
Sarah Brown  
James Bugslag  
Günther Buchinger  
Michel Hérol  
Dave Lüthi  
Madeleine Manderyck  
Victor Nieto Alcaide  
Elizabeth Carson Pastan  
Michael Borisovich Piotrovsky  
Ivo Rauch  
Pedro Redol  
Zsuzsanna van Ruyven-Zeman

## Scientific and Organising Committee

Antoni Vila i Delclòs  
Sílvia Cañellas  
Núria Gil Farré  
Anna Santolària Tura  
Anna Vila Rovira  
Rosa Alcoy

© Logo: Antoni Vila i Delclòs

© Cover: Anna Santolària

© Texts: their authors

© Figs./Abb.: see each caption

Responsibility for intellectual property or image rights lies with the authors of the articles.

ISBN: 978-84-09-39805-8

Scientific editors: Sílvia Cañellas and Sarah Brown

Proof-reading by Karine Boulanger, Ellen Shortell, Joseph Spooner and Stefan Trümpler

© General editing and layout: Sílvia Cañellas

Publisher: Corpus Vitrearum Catalunya

Amb el suport de / Sponsored by:

Departament de Cultura de la Generalitat de Catalunya and Diputació de Girona

Impression: I am Núria print – @iamnuriaprint

## Forum Programme

### 7 July 2022 – GIRONA

- 08:00 Plaça Catalunya 21, Barcelona. Registration and departure to Girona (by bus).
- 09:30-10:00 Colloquium and Forum, *Sala Josep Irla* (Covid restrictions permitting).  
Welcome by the local officials.
- 10:00-10:45 Coffee break at the *Casa de Cultura de la Diputació de Girona*.  
**Visit:** Fita Foundation, 2nd floor.
- 10:45-12:05 **Lecture session 1** (papers and discussion), Aula Magna de la Casa de Cultura de la Diputació de Girona: chaired by Ivo Rauch.
- 12:15-13:15 **Lecture session about the "Glaziers' Tables"** (papers and discussion), *Sala Josep Irla*: chaired by Sarah Brown.  
Speakers: Stefan Trümpler (Colloquium) and Anna Santolària (Forum)
- 13:15-14:30 Lunch break.
- 14:30-17:30 **Tour / Visit:** the Cathedral and the Art Museum (white-washed tables of Girona); optional: *Sant Feliu Church, Casa Masó*.
- 17:30 Garden of Art Museum.
- 18:00 Return to Barcelona.
- 21:00 Official dinner for Colloquium and Forum attendees.

### 8 July 2022 – BARCELONA

*Seminari Conciliar de Barcelona, Aula Magna (c/ Diputació 231)*

- 09:00 Welcome.
- 09:20-11:00 **Lecture session 2** (lectures and discussion): chaired by Sarah Brown.
- 11:00-11:20 Poster session and coffee break.
- 11:20-13:00 **Lecture session 3** (lectures and discussion): chaired by Yvette Vanden Bemden
- 13:00-14:20 Lunch break (lunch not included).
- 14:20-16:00 **Lecture session 4** (lectures and discussion): chaired by Claudine Loisel.
- 17:00- 18:30 **Visit:** Church and Chapter House of *Reial Monestir de Santa Maria de Pedralbes*.

### 9 July 2022 – BARCELONA

*Seminari Conciliar de Barcelona (Aula Magna)*.

- 09:00-10:20 CSIV meeting.
- 10:20-10:50 Poster session and coffee break.
- 10:50-12:30 **Lecture session 5** (lectures and discussion): chaired by Ellen Shortell.
- 12:30-13:15 **Conclusions:** closing of the 11th Forum for the Conservation and Technology of Historic Stained Glass: chaired by Ivo Rauch and Sarah Brown.



## CONTENTS – SOMMAIRE – INHALTSVERZEICHNIS – ÍNDEX

<b>WELCOME</b> .....	7
<b>PAPERS</b>	
<b>Lecture session 1: chaired by Ivo Rauch</b>	
1.1. Schutzverglasung: ein thermodynamischer Rückblick auf die letzten 30 Jahre, Erfolge, Misserfolge und Schlussfolgerungen für zukünftige Projekte	
Hans-Jürgen Daams, Michael Robrecht.....	9
1.2. The Inherited Condition: The Complex Methodology Required to Conserve the West Choir Windows of Naumburg Cathedral, Germany	
Sarah Jarron, Jana Hildebrandt, Mayre Maquiné, Emily Yates.....	18
1.3. Finding Faces: Reconstructing Liturgical Identity in the Medieval West Choir Windows at Naumburg Cathedral, Germany	
Emily Yates, Sarah Jarron, Mayre Maquiné & Jana Hildebrandt .....	27
<b>Lecture session about "the Glaziers' Tables"</b>	
1.4. The White-Washed Table and the Medieval Windows of Girona Cathedral	
Anna Santolària .....	34
<b>Lecture session 2: chaired by Sarah Brown</b>	
2.1. Optimierung der entspiegelten Schutzverglasung vor Glasmalereien am Kölner Dom	
Felix Busse & Ulrich Huber .....	42
2.2. The Use of Particle Accelerator Analysis to Identify the Origin and Production Processes of 16th-Century Stained-Glass Windows at St Marie’s Cathedral in Auch	
Barbara Trichereau, Claudine Loisel, Françoise Gatouillat & Michel Hérold.....	50
2.3. Konservierung historischer Spiegel. Konzept und Konservierung historischer Spiegel aus den Audienzgemächern Augusts des Starken im Dresdener Schloss	
Markus Kleine, Simone Schmidt & Christoph Sander.....	60
2.4. Narrative from Nonsense: Questions of Identity in the St Cuthbert Window, York Minster	
Katharine Harrison .....	67
<b>Lecture session 3: chaired by Yvette Vanden Bemden</b>	
3.1. Automatic Determination of Damage to Cultural assets by Means of Artificial Intelligence	
Michael Robrecht, Markus Boeger & Hans-Jürgen Daams.....	75
3.2. Ludwig Mittermaier und seine Glaswerkstatt – ein Multitalent des 19. Jahrhunderts	
Susann Seyfert & Dunja Kielmann .....	82
3.3. Die Glasmalereien der Liebfrauenkirche aus Oberusel im Taunus. Eine Betrachtung der Fenster von Giselbert Hoke aus kunst- und restaurierungstechnologischer Sicht	
Ronja Lammers, Markus Kleine & Steffen Holtmann .....	90
3.4. A New Isothermal System that Avoids the Cold Bridge between the External and Internal Glazing (A Solution Specifically Designed for Extreme Weather Conditions)	
Rob MacInnes.....	99

**Lecture session 4: chaired by Claudine Loisel**

4.1. The Importance of Preferences and Taste in the Conservation of Works of Art	
Fernando Cortés Pizano .....	105
4.2. The Historical Requirement on the Identity of a Piece of Art	
Paloma Somacarrera .....	116
4.3. Documentation and Reconstruction of the Depiction of the Virgin Mary in the 15th-Century Stained-Glass Window of the <i>Annunciation</i> from the Dominican Monastery in Kraków	
Edyta Bernady .....	125
4.4. The Stained Glass Conservation of Trinity Church, Wall Street	
Brianne Van Vorst & Drew Anderson .....	133

**Lecture session 5: chaired by Ellen Shortell**

5.1. La dalle de verre : évaluation de méthodes non invasives pour le diagnostic des œuvres menacées	
Sophie Wolf, Johannes Hugenschmidt & Christophe Gosselin .....	142
5.2. Against the Dying of the Light: Enamel Analysis and the Conservation Problems of Art Nouveau Windows	
Jordi Bonet, Martí Beltrán & Trinitat Pradell.....	149
5.3. Grisaille Production: Some Examples from the 14th to the 20th Centuries	
Carla Machado, Márcia Vilarigues, Luís Cerqueira Alves & Teresa Palomar .....	159
5.4. Physico-Chemical Insights into Sanguine and Carnation Based on Reproduced Historic Recipes	
Anne-Catherine Perreau, Helena Wouters & Aletta Rambaut .....	167

**POSTERS**

FP1. La restauration des vitraux de la chapelle royale du château de Versailles	
Claudine Loisel, Barbara Trichereau & Stéphanie Touron.....	175
PF2. Challenges with the Exhibition of Stained Glass: A Discussion among Researchers, Conservators and Craftspersons	
Virginia C. Raguin.....	180
PF3. La conservation préventive des vitraux : la verrière de protection	
Adèle Rellier & Barbara Trichereau et Claudine Loisel .....	184
PF4. Preserving Idols in Stained Glass: Conservation Assessment of Napier Waller's Stained-Glass Windows at the Australian War Memorial	
Jacqueline Jordan .....	189

**APPENDIX – APPENDICE – ANHANG – APÈNDIX**

Text en català de les <i>Directrius per a la conservació i restauració de vitralls, Corpus Vitrearum/ICOMOS</i> .	193
---	-----

**VISITS**

Church of Reial Monestir de Santa Maria de Pedralbes	
Montserrat Pugès .....	197
Other Churches	
Corpus Vitrearum Catalunya.....	199



## 5.1

### La dalle de verre : évaluation de méthodes non invasives pour le diagnostic des œuvres menacées

Sophie Wolf

Vitrocentre Romont, Suisse

Johannes Hugenschmidt

OST-Ostschweizer Fachhochschule, Fachstelle für Zerstörungsfreie Prüfung, Suisse

Christophe Gosselin

Geotest SA, Mont-sur-Lausanne, Suisse

#### **Dalle de verre: Evaluation of Non-Invasive Methods for Diagnosing Threatened Works – Abstract**

The dalle de verre technique consists of thick slabs of coloured glass set in a matrix of reinforced concrete. In Switzerland, this technique made its way in the mid-1930s and the technique reached its peak in the 1950s to 1980s. After around 70 years, many of the works are in poor condition. The complexity of the problems affecting dalles de verre call for specific conservation approaches that must be determined on a case-by-case basis. So far, research has mainly focused on the analysis of larger historic structures, and there is still no suitable approach to the damage assessment of dalle de verre. The initial focus of a

research project initiated by the Vitrocentre Romont therefore was to develop a practical, non-invasive and inexpensive 'toolkit' for systematically documenting the preservation condition of dalles de verre in their structural, physical and climatic setting. Various instruments such as georadar, ultrasound and surface potential measurements have been tested. The measurements provided valuable information on the advantages and limitations as well as the costs of the methods used. This paper presents a synthesis of the results of the in situ and laboratory analyses and discusses the viability, practicality and effectiveness of the tested techniques

#### **Betonverglasungen: Evaluation nicht-invasiver Methoden zur Diagnose gefährdeter Werke – Zusammenfassung**

Betonverglasungen bestehen aus meist dicken farbigen Glasstücken, die in eine Matrix aus Stahlbeton eingefügt sind. In der Schweiz entfaltet sich diese Technik ab der Mitte der 1930er Jahre und erreicht ihren Höhepunkt in den 1950er bis 1980er Jahren. Nach rund 70 Jahren befinden sich viele Werke in schlechtem Zustand. Die Komplexität der Schäden und Schadensursachen erfordert spezifische Erhaltungsmaßnahmen, die von Fall zu Fall festgelegt werden müssen. Auf dem Gebiet der Erhaltung von Strukturen aus Stahlbeton hat sich die Forschung bisher vor allem auf größere historische Bauwerke konzentriert. Für die Analyse von Betonverglasungen

gibt es bisher noch keine geeigneten Methoden. Im Mittelpunkt eines vom Vitrocentre Romont initiierten Forschungsprojekts stand daher zunächst die Entwicklung eines praktischen, nicht-invasiven und kostengünstigen Instrumentariums zur systematischen Dokumentation des Erhaltungszustands von Betonverglasungen in ihrem baulichen, physikalischen und klimatischen Umfeld. Es wurden verschiedene Instrumente wie Georadar, Ultraschall und Oberflächenpotentialmessungen getestet. Die Untersuchungen lieferten wertvolle Informationen zu den Möglichkeiten und Grenzen sowie den Kosten der verwendeten Methoden. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der in situ-Messungen und Laboranalysen zusammengefasst und die Durchführbarkeit, Praktikabilität und Wirksamkeit der Methoden erörtert.

#### **La technique de dalle de verre**

Un vitrail en dalle de verre est constitué d'épaisse pièces de verre coloré serties dans une matrice de « béton armé ».<sup>1</sup> Étant étroitement liée aux développements de l'architecture vers le tournant du XX<sup>e</sup> siècle, la dalle de verre a connu son premier âge d'or avec la reconstruction des églises après la Première Guerre mondiale ; l'apogée de cette forme d'art monumental se situe entre les années 1950 et 1980. La technique et les matériaux employés pour la fabrication des vitraux en dalle de verre ne changent pas beaucoup au cours des décennies qui suivent son invention autour des années 1930. C'est seulement à partir des années 1980 environ que des matériaux plus légers comme la résine époxy remplacent le mortier.

<sup>1</sup> Le mortier diffère du béton essentiellement par la taille de l'agrégat. Le béton est composé de ciment, sable, gravier, eau et adjuvants éventuels ; un mortier, par contre, ne contient pas de gravier. Selon cette définition, la plupart des dalles de verre sont composées de « mortier armé » et de verre coloré. Nous avons toutefois décidé d'utiliser le terme plus courant de « béton armé », même s'il n'est pas strictement correct.

En Suisse, l'artiste et peintre-verrier Alexandre Cingria (1879–1945) est l'un des premiers à créer des fenêtres avec cette technique, entre autres un grand vitrail pour le chœur de l'église du couvent des Cordeliers à Fribourg. Pour la majeure partie de ses réalisations, Cingria travaille étroitement avec le Français Jean Gaudin (1912–1945). Il faudra attendre le début des années 1950 pour voir apparaître les premiers ateliers en Suisse capable de fabriquer des dalles de verre. L'un d'entre eux est celui d'Aubert et Pitteloud à Lausanne. Cet atelier est chargé, en 1954, de réaliser les vitraux en dalle de verre de l'église catholique de Courfayvre, élargie et restaurée par l'architecte jurassienne Jeanne Bueche (1912–2000), qui fait appel à Fernand Léger (1881–1955) pour la conception des vitraux.<sup>2</sup>

Après environ 70 ans d'existence, de nombreuses dalles de verres présentent des dommages, parfois graves. Outre les dégradations spécifiques au mortier ou au béton, dues en partie à la qualité insuffisante des matériaux, les interactions physiques et chimiques entre le mortier et le verre présentent des défis techniques particuliers pour leur conservation. A ces difficultés s'ajoutent le fait que le diagnostic des dégâts, tout comme les mesures éventuelles de conservation à prendre, doivent être effectués sur l'objet lui-même.

Alors que la recherche s'intéresse depuis longtemps déjà à la rénovation des constructions historiques en béton,<sup>3</sup> la conservation des dalles de verre n'a fait l'objet que d'un nombre limité d'études.<sup>4</sup> Celles-ci se sont principalement concentrées sur le développement de méthodes et de matériaux pour la restauration des dalles de verre, en accordant peu d'attention aux méthodes employées pour l'analyse des œuvres. Jusqu'à aujourd'hui, aucune étude ne s'est penchée sur le recensement et le monitoring systématiques des dommages spécifiques à cette technique. C'est à cette thématique particulière que ce projet, initié par le Vitrocentre Romont, souhaite apporter des réponses.

### Questions, buts et méthodes du projet

L'examen sur place des dalles de verre est un défi pour les conservateurs et restaurateurs. Les œuvres sont souvent difficiles d'accès et les dommages ne sont pas toujours facilement identifiables. Une analyse de l'état de préservation est toutefois le prérequis pour la planification des mesures de préservation. Bien qu'il existe des méthodes et des outils pour l'étude des structures en béton, les investigations sont généralement complexes, coûteuses et non adaptées à l'analyse d'œuvres d'art fragiles telles que les dalles de verre. En plus, les études se basent souvent sur des méthodes invasives, nécessitant un prélèvement d'échantillons (carottes de diamètre minimal de quelques centimètres).

L'objectif principal d'une collaboration de recherche interdisciplinaire entre le Vitrocentre Romont, la Haute école des sciences appliquées OST de Rapperswil et l'entreprise Geotest SA à Mont-sur-Lausanne était donc de mettre au point des méthodes pratiques, non invasives et peu coûteuses pour le relevé et la documentation systématiques des propriétés et des dommages, ainsi que pour l'identification des détériorations des dalles de verre dans leur cadre structurel, physique et climatique. Le deuxième but du projet, tout aussi important, était de déterminer l'état de conservation des dalles de verre examinées en combinant les méthodes testées avec l'analyse visuelle.

Nous avons étudié en particulier la position et le degré de corrosion des armatures, l'épaisseur de l'enrobage ainsi que les compositions du mortier et des verres. Pour l'analyse des propriétés du béton armé, nous avons testé et évalué diverses méthodes non invasives telles que le géoradar, les ultrasons et les mesures de potentiel électrochimique de surface.<sup>5</sup> Étant donné que la majorité des instruments ont été développés pour l'étude de grandes constructions en béton, les approches ont été adaptées à l'analyse des structures plus fines et fragiles des dalles de verre. Les mesures ont été évaluées en termes de facilité d'application, de coûts et d'avantages. Les compositions du béton et des verres ont été identifiées sur des échantillons millimétriques par microscopie électronique à balayage en laboratoire. Une première tentative de caractérisation des verres par fluorescence des rayons X portable n'a, quant à elle, pas fourni de résultats pertinents.

<sup>2</sup> Pour un résumé sur l'histoire de la dalle de verre en Suisse, voir NOVERRAZ, SAUTEREL, WOLF 2021, p. 50–59.

<sup>3</sup> Par exemple : BERTOLINI et al. 2011, p. 146–154; MARIE-VICTOIRE et al. 2016, p. 343–350; PÖRTNER 1997, p. 120–126.

<sup>4</sup> Entre autres : ALBERT et al. 2014 ; CUZANGE et al. 2010, p. 176–182 ; DE VIS et al. 2013, p. 43–52 ; PEPI, BUCHNER, GEMBINSKI 2012, p. 3–12 ; SANDER et al. 2011, p. 48–53 ; ÜNAL&KÜHNE 2013, p. 343–350.

<sup>5</sup> Par exemple : BREYSSE (dir.) 2012 ; HUGENSCHMIDT 2010, p. 317–333.

Cette contribution présente une synthèse des résultats des analyses non invasives et discute de la praticité et de l'efficacité de l'approche développée. L'étude complète sera publiée ultérieurement dans une revue scientifique.<sup>6</sup>

### Description des dalles de verre analysées

Dans le cadre de ce projet, nous avons pu étudier plusieurs dalles de verre du grand cycle de vitraux de Fernand Léger à l'église Saint-Germain-d'Auxerre à Courfaivre (canton du Jura) ainsi que le grand vitrail en dalle de verre d'Alexandre Cingria au couvent des Cordeliers à Fribourg (canton de Fribourg).<sup>7</sup>

Le cycle de Fernand Léger a été conçu pour les nouveaux collatéraux en béton armé de l'église de Courfaivre construits par l'architecte jurassienne Jeanne Bueche en 1954.<sup>8</sup> Il se compose de dix médaillons encadrés de panneaux rectangulaires dans les fenêtres hautes de la nef et de deux vitraux en arc en plein-cintre dans le chœur. Cet ensemble figuratif est complété par des dalles de verre abstraites décorant les bas-côtés de l'église (fig. 1a). Le programme iconographique du cycle a été établi par l'architecte et le curé de l'église et élaboré en étroite collaboration avec l'artiste. La réalisation des dalles de verre est confiée à l'atelier de verriers Aubert et Pitteloud de Lausanne. Les médaillons ont un diamètre de 1,61 m ; ils sont tenus par un cadre rond métallique avec un profil en forme de « L » vissé dans la structure en béton armé. Les deux grands vitraux dans le chœur mesurent 3,06 m de haut pour 1,04 m de large. Ils sont montés avec un mortier de pose dans la feuillure de la baie depuis l'intérieur et scellés avec un mortier de pose. Les médaillons comme les grands vitraux dans les baies du chœur ont été moulés en une pièce. La face externe du panneau correspond à la face inférieure de la dalle de verre lors du moulage. Elle est lisse et montre des « marques de plis » suggérant que le panneau a été coulé sur des draps (fig. 1b). La face interne du panneau correspond à la face supérieure de la dalle de verre ; elle est légèrement rugueuse.



Fig. 1. Église Saint-Germain-d'Auxerre à Courfaivre, a) vue extérieure de la façade sud avec médaillons en dalle de verre, Fernand Léger, 1954 ; b) détail de la face externe du médaillon de l'Annonciation.

© 2021, ProLitteris, Zurich, photos S. Wolf, Vitrocentre Romont.

Le grand vitrail d'Alexandre Cingria a été conçu pour la fenêtre axiale de l'église du couvent des Cordeliers à Fribourg et réalisé par Jean Gaudin entre 1936 et 1938.<sup>9</sup> Il s'agit d'un vitrail tripartite monumental d'environ six mètres de haut et de deux mètres de large, consacré au thème de la Pentecôte. Environ 40 ans après sa création, l'église fait l'objet d'une grande transformation, lors de laquelle la majorité des ajouts des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles sont effacés, y compris la dalle de verre de Cingria, déposée en 1978. Les 24 panneaux sont aujourd'hui conservés aux archives du couvent des Cordeliers (fig. 2a). Leurs épaisseurs varient entre 2 et 4cm. Ils sont moulés individuellement. Chaque bord est rehaussé (à l'intérieur), formant une sorte de « cadre ». La face interne des panneaux est rugueuse ; elle correspond à la face supérieure de la dalle de verre lors de la fabrication. Les parties en béton armé plus larges sont sculptées (en relief) afin d'accentuer les formes. La face externe des panneaux correspond à la face inférieure lors du coulage. Est légèrement texturée et peut avoir été créée en versant le mortier sur une surface recouverte de textile, pour créer la texture désirée et faciliter le démoulage (fig. 2b).

<sup>6</sup> HUGENSCHMIDT, WOLF, GOSSELIN (à paraître) ; GOSSELIN&WOLF&HUGENSCHMIDT (à paraître).

<sup>7</sup> Les dalles de verres analysées sont décrites dans la banque de données en ligne du Vitrocentre Romont [www.vitrosearch.ch](http://www.vitrosearch.ch). Nous remercions donc ici à une description détaillée.

<sup>8</sup> BUECHE 1957, p. 5–8.

<sup>9</sup> RUDAZ 1997, p. 10–15.





Fig. 2. Archives du couvent des Cordeliers, a) quelques panneaux du vitrail en dalle de verre déposé en 1978, Alexandre Cingria, 1938 ; b) détail de la face externe du panneau 3b en lumière réfléchie.  
© Couvent des Cordeliers, Fribourg, photos S. Wolf, Vitrocentre Romont.

## Résultats et évaluation des analyses non-invasives

### Position des armatures

La détermination de la position des armatures est une première étape importante dans le diagnostic des dégâts, car la corrosion des armatures peut entraîner un écaillage important au béton. La position des fers peut être déterminée avec précision et un minimum d'efforts à l'aide d'un aimant puissant et d'un papier fixé sur la dalle de verre, mais seulement jusqu'à une profondeur de 15–20mm. Les mesures avec le profomètre à induction avec analyse et interprétation automatisées ainsi qu'avec un géoradar donnent également des résultats fiables (fig. 3). L'avantage des deux dernières méthodes est qu'elles permettent de déterminer non seulement la position, mais également l'épaisseur de l'enrobage des fers jusqu'à une profondeur de 100mm (voir ci-dessous) ; en outre, les mesures peuvent être enregistrées et visualisées. Cependant, l'acquisition et le traitement de données sont chronophages, et les appareils, par ailleurs coûteux, ne peuvent être utilisés que par des spécialistes.



Fig. 3. Position des armatures dans le médaillon de l'Annonciation à Courfaivre déterminée avec un aimant (à gauche) et à l'aide d'un profomètre Hilti Ferroskan PS200 avec analyse et interprétation automatisées (à droite). © Auteurs.

### Épaisseur d'enrobage

L'épaisseur de l'enrobage est un paramètre important puisqu'il permet d'évaluer le risque de corrosion des armatures dans les dalles de verre. L'épaisseur et la compacité du mortier régissent la cinétique de carbonatation et donc de la corrosion. En règle générale, les fers proches de la surface corrodent plus facilement que ceux bien enrobés de mortier. Ce paramètre peut être bien déterminé avec un profomètre à induction, manuel ou automatisé, ainsi qu'avec un géoradar. Les mesures, effectuées avec les deux techniques, ont fourni des valeurs cohérentes. A titre d'exemple, les armatures du médaillon de l'*Annonciation* se situent à une profondeur de 20–30mm ; dans certaines zones, les fers reposent directement sous la surface.

Le profomètre à induction est la moins coûteuse des deux méthodes. Cependant, le coût d'un appareil avec mesures et interprétations automatisées est de 10 000 à 15 000 CHF. Les mesures peuvent encore être réalisées par une personne préalablement formée, mais l'évaluation des résultats nécessite du temps et des connaissances sur les logiciels spécifiques.

### Corrosion des fers d'armature

La seule méthode pour déterminer le degré de corrosion des armatures – outre l'analyse visuelle des fers apparents – est la mesure du potentiel électrique. Comme il était exclu de réaliser une connexion directe avec les armatures, car pour cela il faut dégager et percer une armature, les différences de potentiel ont été mesurées entre deux points à la surface. Le désavantage de cette approche non invasive est lié au fait que la surface doit être mouillée pour créer un contact optimal entre les deux électrodes. En outre, les résultats ne sont que qualitatifs et nécessitent être calibrés par d'autres observations ou mesures pour être pertinents. L'équipement est peu coûteux, mais les mesures et l'interprétation des données demandent une certaine expérience.

Les différences de potentiel enregistrées ont été validées à l'aide de l'examen visuel : selon notre dispositif, les zones avec des fers apparents et/ou fortement fissurées coïncident relativement bien avec celles ayant des valeurs de potentiel supérieures à 50 mV. Toutefois, les valeurs limites obtenues restent relatives à l'objet étudié et peuvent varier selon l'état de saturation en eau du mortier. Les tendances observées doivent être confirmées par d'autres mesures sur d'autres objets afin d'adapter la méthode si nécessaire.

### Épaisseur des dalles de verre

L'épaisseur des dalles de verre peut être déterminée et documentée à l'aide du géoradar et des ultrasons ; les deux techniques ont été testées à Courfaivre. Après une calibration empirique, les deux méthodes fournissent des résultats quantitatifs fiables. Les épaisseurs déterminées avec les ultrasons correspondent aux valeurs mesurées avec le géoradar (fig. 4). Les mesures obtenues par ultrasons sont beaucoup moins chères et plus simples que celles réalisées par le géoradar. L'ultrason, cependant, ne permet que des mesures individuelles alors que le profil d'épaisseur d'une dalle de verre entière peut être mesuré et visualisé par géoradar.

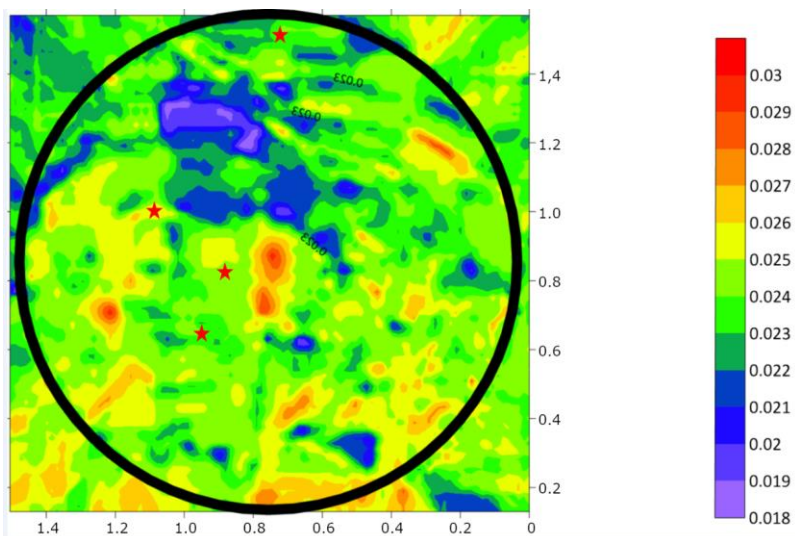


Fig. 4. Médaillon de l'*Annonciation* de Fernand Léger à Courfaivre, épaisseur (en mètres) du médaillon déterminée avec le géoradar. Les points mesurés par ultrasons sont indiqués avec une étoile.  
© Auteurs.

### *Propriétés du béton : fissures, porosité, humidité*

La détermination des propriétés du béton armé est une problématique complexe, se basant généralement sur l'analyse de « carottes », échantillons de plusieurs centimètres forés dans le béton. Cependant, les méthodes non invasives telles que la thermographie, les ultrasons et le géoradar peuvent également fournir des informations sur les propriétés du matériau, en particulier sur ses hétérogénéités, telles que la densité et la porosité du matériau, les zones de fissures et les zones humides. Dans le cadre du projet, différentes méthodes (thermographie, géoradar, mesures de résistivité et du potentiel électrochimique) ont donc été testées pour leurs valeurs informatives en ce qui concerne les propriétés du mortier.

Les images thermographiques ont été enregistrées et évaluées à Fribourg et à Courfaivre. Sur l'image thermographique d'un panneau d'Alexandre Cingria, les différences de température observées – qui ne sont pas liées à la présence d'armatures – pourraient s'expliquer par des hétérogénéités dans le béton, par exemple par une porosité et/ou une humidité plus élevée ou par la présence de microfissures. Cependant, l'interprétation des images reste difficile et la question ne peut pas être résolue sans investigations supplémentaires (la technique récente de résonance magnétique nucléaire du proton,  $H^1$  NMR, portable et non destructive, pourrait être une technique à explorer pour évaluer les différences de porosité des mortiers). Les images thermographiques obtenues sur les dalles de verre à Courfaivre n'ont pas été exploitées car estimées peu pertinentes. En revanche, les mesures du géoradar, dont l'atténuation du signal électromagnétique est fortement influencée par le degré de saturation en eau du mortier, ont fourni des résultats estimés plus fiables sur l'indication des zones à forte humidité interne.

La mesure du potentiel électrique fournit également des informations indirectes sur le degré de corrosion des armatures et sur les fissures cachées dans le béton, mais le manque de référentiels ou de valeurs comparatives (base de données) fait encore défaut pour pouvoir interpréter les résultats. La méthode de mesure de résistivité n'a, quant à elle, pas fourni des résultats complémentaires.

Même si toutes les méthodes testées sont potentiellement adaptées à la caractérisation du béton, leur apport ne peut être évalué de manière concluante à l'heure actuelle. En tout état de cause, il serait intéressant de poursuivre et de développer certaines techniques, notamment la thermographie et le potentiel électrique sur d'autres vitraux en dalle de verre.

### **Composition du mortier et des verres**

La caractérisation chimique du mortier et des verres peut être effectuée de manière fiable en laboratoire à l'aide de l'analyse par microscopie électronique à balayage. La condition préalable à l'analyse en laboratoire est le prélèvement d'échantillons. La méthode n'est donc pas non destructive, même si des échantillons de quelques millimètres suffisent pour l'analyse. Dans certains cas, un prélèvement d'échantillons semble toutefois légitime, notamment lorsque des fragments de mortier ou de verre sont déjà détachés, comme c'était le cas pour le vitrail d'Alexandre Cingria. Les analyses en laboratoire sont toutefois assez coûteuses et nécessitent de l'expérience dans le domaine de la caractérisation des matériaux. Une autre limitation réside dans le fait qu'un certain nombre d'échantillons représentatifs est nécessaire pour obtenir des résultats représentatifs eux aussi.

### **Réflexions et perspectives**

Les deux campagnes de mesures menées dans le cadre du projet ont permis d'acquérir des informations sur la faisabilité, les avantages et les coûts des méthodes non invasives utilisées pour étudier des vitraux en dalle de verre. La combinaison des différentes méthodes s'est avérée être un outil efficace pour l'identification des matériaux, la documentation et la cartographie des dommages de manière non invasive et *in situ*. L'étude a montré que certaines techniques, comme le géoradar, présentent des avantages en terme d'informations sur les armatures et le béton, malgré les inconvénients de temps et coût consacrés (temps de mesure, interprétation par un spécialiste). Toutefois, les résultats illustrent que la méthodologie n'est pas perfectionnée à tous les égards et que certains problèmes restent non résolus. La caractérisation des propriétés du béton par des méthodes non invasives s'est avérée particulièrement difficile, même si plusieurs méthodes se sont révélées prometteuses.

Il est évident que les résultats de cette étude doivent encore être validés par l'étude d'autres dalles de verre afin de confirmer et préciser les limitations mises en évidence dans ce projet. Il est également clair que l'examen visuel reste indispensable dans l'analyse des dégradations. Les études non destructives et

micro-invasives ne peuvent pas le remplacer, mais sont complémentaires en rendant « visibles » les dommages qui se trouvent sous la surface et sont cachés à l'œil nu.

Nous espérons pouvoir poursuivre les recherches dans un projet de suivi qui nous permettra de développer les techniques d'analyse et d'agrandir la base de données en étudiant d'autres objets, possiblement plus détériorés, afin de répondre aux questions qui demeurent ouvertes.

## Bibliographie

- Àngel ALBERT ESTEVE, Jordi BONET DE AHUMADA, David MONTOLÍO TORÁN, "Restauración de la vidriera de hormigón del Seminario Diocesano Mater Dei en Castellón: Retos de ayer y hoy", intervention aux XXXVII<sup>e</sup> *Curset jornades internacionals sobre la intervenció en el patrimoni arquitectònic*, Barcelone, 2014, accessible en ligne : <http://hdl.handle.net/2099/16332> [dernier accès 12 janvier 2022].
- Luca BERTOLINI, Maddalena CARSA, Matteo GASTALDI, Federica LOLLINI, Elena REDAELLI, "Corrosion Assessment and restoration strategies of reinforced concrete buildings of the cultural heritage", *Materials and Corrosion*, 62, 2, 2011, p. 146–154.
- Denys BREYSSE (dir.), *Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques*, Springer, Berlin, 2012.
- Jeanne BUECHE, « Die Kirche von Courfaivre und ihre Bildfenster », *Cementbulletin*, 25, 24, 1957, p. 1–10.
- Laurence CUZANGE, Claudine LOISEL, Élisabeth MARIE-VICTOIRE, William FAURE, « Conserver les dalles de verre : un nouveau défi interdisciplinaire pour le vingt et unième siècle », in Mary B. SHEPARD, Lisa PILOSI, Sebastian STROBL (dir.), *The art of collaboration stained-glass conservation in the twenty-first century*, Harvey Miller Publications, London, 2010, p. 176–182.
- Kristel DE VIS, Joost CAEN, Koen JANSSENS, Patric JACOBS, « The consolidation of cracks and fissures in dalle de verre. Assessment of selected adhesives », in Hannelore ROEMICH, Kate VAN LOOKEREN CAMPAGNE (dir.), *Recent Advances in glass, stained glass and ceramics conservation 2012*, Spa Uitgevers, Zwolle, 2013, p. 43–52.
- Christophe GOSSELIN, Sophie WOLF, Johannes HUGENSCHMIDT, « Cingria and Gaudin artwork, a 1936 dalle de verre under the microscope », *Journal of Microscopy - Special issue of the 18th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials* (en préparation).
- Johannes HUGENSCHMIDT, « Ground penetrating radar for the evaluation of reinforced concrete structures », in Christiane MAIERHOFER, Hans-Wolf REINHARDT, Gerd DOBMANN (dir.), *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. Non-Destructive Testing Methods*, CRC Press, Boston, 2010, p. 317–333.
- Johannes HUGENSCHMIDT, Sophie WOLF, Christophe GOSSELIN, *Non-destructive testing of the Fernand Léger Dalles de Verre Glazings in Courfaivre, Switzerland* (en preparation).
- Elisabeth MARIE-VICTOIRE, Myriam BOUICHOU, Teddy CONGAR, Romain BLANCHARD, « Concrete cultural heritage in France—inventory and state of conservation », in Frank DEHN Hans-Dieter BEUSHAUSEN, Mark ALEXANDER, Pilate MOYO (dir.), *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV*, London, CRC Press, 2016, p. 343–350.
- Camille NOVERRAZ, Valérie SAUTEREL, Sophie WOLF, « De béton et de verre : la dalle de verre et ses premières utilisations en Suisse », *Monuments Vaudois*, 11, 2021, p. 50–59.
- Raymond M. PEPI, Laura N. BUCHNER, Christopher GEMBINSKI, « Conservation of Dalle de Verre at the New York Hall of Science », *APT Bulletin: Journal of Preservation Technology*, 45, 4, 2012, p. 3–12.
- Rudolf PÖRTNER, « Patch repair leaves architectural integrity. The Beethoven hall of Stuttgart Liederhalle », in Berthold BURKHARDT, Wessel DE JONGE, Ola WEDEBRUNN (dir.), *The Fair Face of Concrete: Conservation and Repair of Exposed Concrete*, Eindhoven, DOCOMOMO International, 1997, p. 120–126.
- Patrick RUDAZ, « Église des Cordeliers : pas de résurrection en vue pour la Pentecôte », *Pro Fribourg*, 116, 1997, p. 10–15.
- Christoph SANDER, Hans-Carsten KÜHNE, Murat ÜNAL, Markus KLEINE, Anja KÖHLER, Vera KRIESTEN, « Betondickglasfenster - Schadensmechanismen und Instandsetzungsprinzipien zur Erhaltung », *Restaura*, 117, 7, 2011, p. 48–53.
- Murat ÜNAL, Hans-Carsten KÜHNE, « Repair and restoration of Dalle de Verre concrete windows », in Frank DEHN Hans-Dieter BEUSHAUSEN, Mark ALEXANDER, Pilate MOYO (dir.), *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*, London, CRC Press, 2012, p. 343–350.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Madame Petra Zimmer (Archives et Bibliothèque du couvent des Cordeliers) et Monsieur Hubert Girardin (Conseil de la paroisse de Courfaivre) pour leur disponibilité et soutien ainsi que Karin von Wartburg et Valentine Costa pour leur support dans la publication des œuvres étudiées sur vitrosearch.ch. Le projet a été réalisé avec le soutien de l'Office Fédéral Suisse de la Culture – Section Culture du bâti, la Fondation Sophie et Karl Binding et la Fondation UBS pour la culture.

