

« LA DALLE DE VERRE. ANALYSE ET CONSERVATION » RAPPORT FINAL – SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DU PROJET

Sophie Wolf, avec la collaboration d'Agathe Dumont



Participants au projet : Dr. Sophie Wolf, Vitrocentre Romont (coordination du projet), Dr. Johannes Hugenschmidt, Fachhochschule OST, Dr. Christophe Gosselin, Geotest Mont-sur-Lausanne, Agathe Dumont, stagiaire au Vitrocentre Romont du 1er novembre 2020 au 31 mars 2021.

Projet soutenu par : Office fédéral de la culture – Section Culture du bâti, Fondation Sophie et Karl Binding, Fondation UBS pour la culture

« LA DALLE DE VERRE. ANALYSE ET CONSERVATION »

Résumé

La technique de la dalle de verre a une signification particulière dans l'architecture moderne, d'autant plus qu'elle est étroitement liée à l'évolution des constructions en béton. En Suisse, cette technique fait son chemin au milieu des années 1930. Après des pionniers tels qu'Alexandre Cingria, la majorité des artistes actifs dans le domaine verrier créèrent des œuvres en dalle de verre et la technique atteint son apogée dans les années 1950 à 1980. Après environ 70 ans, de nombreux vitraux en dalle de verre présentent des dommages, parfois graves. Jusqu'à présent, les causes de dégradations n'ont guère été étudiées et il n'y a encore aucune approche pratique et adaptée à l'analyse de l'état de conservation des dalles de verre.

L'objectif principal de ce projet interdisciplinaire est donc de mettre au point une méthode pratique, non invasive et peu coûteuse pour le relevé et la documentation systématiques des dommages et l'identification des causes de détérioration des dalles de verre dans leur cadre structurel, physique et climatique. Divers instruments ont été testés et adaptés aux spécificités des vitraux. Les études réalisées au Couvent des Cordeliers à Fribourg (FR) et à l'église de Courfayve (JU) nous ont permis d'acquérir des informations précieuses sur les avantages et les limites ainsi que les coûts des méthodes utilisées. Nous avons, entre autres, pu établir que la position des armatures peut être déterminée de manière précise et avec un minimum d'effort en utilisant un aimant puissant. La mesure de potentiel est la meilleure méthode pour évaluer le degré de corrosion des armatures ; les appareils de mesure sont peu coûteux, mais l'interprétation des résultats exige de l'expérience. Pour les relevés de fissures, des mesures de potentiel donnent de bons résultats, mais là encore, compétence et expérience sont nécessaires pour interpréter les données. L'examen visuel et la documentation photographique restent des méthodes indispensables dans l'analyse des dégradations. Les études non destructives et micro-invasives ne peuvent pas le remplacer, mais elles les complètent en rendant « visibles » les dommages qui se trouvent sous la surface et sont cachés à l'œil nu.

Les recherches ont démontré que les différentes méthodes combinées constituent un « instrument » précieux permettant la caractérisation des matériaux et l'analyse de l'état de conservation des dalles de verre de manière non invasive et *in situ*. Ces approches complémentaires facilitent non seulement le contrôle des œuvres (monitoring), mais servent également de base pour l'élaboration de concepts de préservation, qui tiennent compte de l'intégrité et de l'authenticité historiques, matérielles et techniques de ce patrimoine verrier unique. Cependant, l'étude a également montré que la méthodologie n'est pas perfectionnée à tous les égards et que certains problèmes restent non résolus et certaines questions sont encore sans réponse. La caractérisation des propriétés du béton, en particulier, s'est avérée difficile, même si plusieurs techniques d'analyse se sont révélées prometteuses. Il est évident que les techniques et les résultats doivent encore être validés avec d'autres objets afin de pouvoir faire des recommandations plus fiables. Nous espérons pouvoir poursuivre ces pistes et répondre aux questions ouvertes dans un projet de suivi.

Ce rapport présente une synthèse des résultats d'analyses réalisées *in situ* et de laboratoire et discute la viabilité, la praticité et l'efficacité de l'approche développée. Il s'appuie sur les études des différents partenaires du projet ; les résultats complets de ces recherches sont joints au présent rapport.

Contenu

<i>1</i>	<i>La dalle de verre : origines et avenir.....</i>	<i>4</i>
<i>2</i>	<i>Questions, buts et déroulement du projet.....</i>	<i>7</i>
<i>3</i>	<i>Historique et description des dalles de verre investiguées</i>	<i>8</i>
3.1	Vitrail en dalle de verre d'Alexandre Cingria au Couvent des Cordeliers, Fribourg.....	8
3.2	Cycle des vitraux en dalle de verre de Fernand Léger à l'église de Courfaivre (JU).....	13
<i>4</i>	<i>Méthodes.....</i>	<i>17</i>
4.1	Examen visuel	17
4.2	Documentation photographique.....	18
4.3	Analyses non invasives <i>in situ</i>	18
4.4	Analyses micro-invasives.....	22
<i>5</i>	<i>Résultats et discussion.....</i>	<i>24</i>
5.1	Résultats de l'examen visuel.....	24
5.2	Résultats et évaluation des analyses non-invasives.....	32
5.3	Résultats des analyses micro-invasives	40
<i>6</i>	<i>Réflexions sur l'état de conservation des dalles de verre examinées</i>	<i>42</i>
6.1	Vitrail en dalle de verre d'Alexandre Cingria au Couvent des Cordeliers à Fribourg	42
6.2	Cycle de vitraux de Fernand Léger à l'église St-Germain d'Auxerre à Courfaivre.....	46
<i>7</i>	<i>Réflexions et perspectives.....</i>	<i>49</i>
<i>8</i>	<i>Remerciements</i>	<i>49</i>
<i>9</i>	<i>Bibliographie</i>	<i>50</i>
<i>10</i>	<i>Annexes.....</i>	<i>52</i>

1 La dalle de verre : origines et avenir

Un vitrail en dalle de verre consiste en d'épaisses pièces de verre coloré serties dans une matrice de « béton armé »¹. Étant étroitement liée aux développements de l'architecture vers le tournant du XXe 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 monumentale 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 : après le découpage, les pièces de verre épaies ainsi que les armatures sont disposées sur le carton – dessin grandeur nature – et enchâssées dans du mortier liquide (fig. 1). Durant ce processus, la surface supérieure des verres est recouverte de mortier dont l'excédent est ensuite raclé après la prise du ciment². C'est seulement à partir des années 1980 environ que certains ateliers de verriers commencent à employer des matériaux plus légers comme la résine époxy au lieu du mortier³.



Fig. 1 : Fabrication d'une dalle de verre chez Aubert & Pitteloud, Lausanne.
Clichés du film « À vous de choisir votre avenir. Cimenteur-verrier ». © RTS, Raimond Barrat (1964, 11 avril).

¹ 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. Étant donné que le mot allemand pour la dalle de verre est « Betonverglasung », nous avons toutefois opté d'utiliser le terme plus courant de « béton armé », même s'il n'est pas strictement correct.

² Le documentaire de Raymond Barrat illustre parfaitement le procédé, voir BARRAT 1964.

³ Le Vitromusée Romont en garde un bel exemple de l'artiste Michel Guével ; voir <https://vitrosearch.ch/de/artists/2259927> (repéré le 17 mars 2021).

Les origines de la dalle de verre, cependant, remontent un plus loin dans le temps. C'est autour de 1910 que le peintre verrier suisse Richard Arthur Nüscheler (1877-1950) jette les bases de la technique. Avec son invention de la « fenêtre de pierre », breveté en 1915⁴, il est le premier à combiner verre et « béton armé » pour la fabrication de vitraux. Son invention constitue un jalon important dans l'histoire du renouveau du vitrail au XX^e siècle par l'importance qu'elle accorde à la structure en pierre artificielle, anticipant une des spécificités des vitraux en dalle de verre (fig. 2).



Fig. 2 : Détail d'un « Steinfenster » de Richard A. Nüscheler à l'église Sainte-Marie à Saint-Gall, Neudorf.

les appelle « mosaïques transparentes » ou « mosaïques lumineuses », à cause de l'étroite ressemblance technique qui existe entre le nouveau procédé et la mosaïque⁶. Même si l'invention de la dalle de verre proprement dite est attribuée à Gaudin, c'est Auguste Labouret (1871-1964), également installé à Paris, qui la fait breveter sous le nom de « vitrail en dalle de verre cloisonné en ciment » en 1933⁷. Le verre des vitraux en dalle de verre et des mosaïques provient de l'atelier de Jules Albertini. Jusqu'au commencement de la production de verre coulé à la verrerie de Saint-Just-sur-Loire⁸ en 1946, Albertini est le seul verrier à fabriquer du verre épais⁹.

En Suisse, l'artiste et peintre verrier Alexandre Cingria (1879-1945) est l'un des premiers à créer des fenêtres avec cette technique. À partir de 1935, cet artiste phare du Groupe de Saint-Luc réalise des vitraux en dalle de verre pour plusieurs églises dans le canton de Fribourg, dont celles de Saint-Michel à Sorens (1935) et Saints-Pierre-et-Paul à Orsonnens, le chœur de l'église du Couvent des Cordeliers à Fribourg (1938) et la chapelle de l'Université Miséricorde, tous deux à Fribourg (1941)¹⁰.

⁴ Brevet d'invention n° CH 68289, publié 1er mars 1915 (voir bibliographie).

⁵ Pour une description plus complète sur l'invention de la fenêtre de pierre et leurs liens avec la dalle de verre, voir WOLF et TRÜMPLER 2019, 178-179.

⁶ LOIRE 1989, 41.

⁷ Brevet d'invention n°756.065 publié le 3 décembre 1933 (voir bibliographie).

⁸ La verrerie Saint-Just est aujourd'hui membre du groupe Saint-Gobain.

⁹ MEER 2002, 25.

¹⁰ NOVERRAZ, SAUTEREL et WOLF 2021.

Pour la majeure partie de ces réalisations, Cingria travaille étroitement avec Jean Gaudin (fig. 3). 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 Aubert & Pitteloud à Lausanne. Cet atelier s'est fait un nom depuis 1952 avec la production de « dalles en béton armé translucide » et de « béton et vitrage translucide ». En 1954, il est chargé de réaliser les vitraux en dalle de verre de l'église catholique de Courfaivre, élargie et restaurée par l'architecte jurassienne Jeanne Bueche (1912-2000)¹¹. Enthousiasmée par les possibilités techniques et artistiques de la dalle de verre, elle fait appel à Fernand Léger pour la conception des vitraux. Ce mandat a certainement été décisif pour l'orientation et la spécialisation ultérieures de l'atelier Aubert & Pitteloud et lui assure de nombreuses commandes. Dans le but de promouvoir la profession de cimenteur-verrier, son directeur Alfred Aubert fonde l'Union Suisse de béton translucide en 1962, dont il devient le premier président¹².



Fig. 3 : Signature de Jean Gaudin sur le vitrail en dalle de verre d'Alexandre Cingria au Couvent des Cordeliers à Fribourg.

Aujourd'hui, bien que devenue plus rare, la technique de la dalle de verre se perpétue encore et les risques de sa disparition et de la perte de son savoir-faire semblent pour l'instant écartés. Actuellement, c'est la préservation des œuvres existantes qui est un enjeu central : après environ 70 ans d'existence, de nombreuses dalles de verres présentent des dommages, parfois graves. Outre les dégradations spécifiques au mortier ou béton, dues en partie à la qualité insuffisante du matériau, les interactions physiques et chimiques entre le mortier et le verre présentent des défis techniques particuliers pour leur conservation. À ces

difficultés s'ajoute 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, la conservation des dalles de verre n'a fait l'objet que d'un nombre limité d'études¹³. Celles-ci se sont principalement concentrées sur le développement de méthodes et de matériaux pour la restauration des structures en « béton » ou du verre, en accordant peu d'attention aux processus de détérioration typiques des vitrages en dalle de verre. 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.

¹¹ BUCHE 1957, 5-8.

¹² Voir BARRAT (1964). L'entreprise a été radiée du Registre du Commerce le 18 février 2019.

¹³ KUSKE et BRUNNER (1989), 1-10 ; CUZANGE, LOISEL, MARIE-VICTOIRE et FAURE (2010), 176-182 ; PÖRTNER (2000), 63-59 ; PEPI, BUCHNER, GEMBINSKI (2012), 3-12 ; BREYSSE (2012) ; DE VIS, CAEN, JANSSENS et JACOBS (2013), 43-52 ; ÜNAL et KÜHNE (2011) ; ÜNAL, KÜHNE, KLEINE ET SANDERS (2011) ; BUSSE, HEIDRICH, KLEINE, SANDER et ÜNAL (2015).

2 Questions, buts et déroulement 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 conservation est toutefois le prérequis de base pour la planification des mesures de préservation.

Jusqu'à présent, il n'y a pas eu d'approches spécifiques pour l'analyse des dalles de verre. 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 verre¹⁴. En plus, les études se basent souvent sur des méthodes « destructives », nécessitant un prélèvement d'échantillons (carottes avec un diamètre de 5 cm minimum).

L'objectif principal de ce projet interdisciplinaire est de mettre au point une approche et des outils de travail pratiques, non invasifs et peu coûteux pour le relevé et la documentation systématiques des propriétés matérielles et dommages ainsi que l'identification des causes de détérioration des dalles de verre dans leur cadre structurel, physique et climatique. Nous avons étudié en particulier, la composition du mortier et des verres, le degré de carbonatation du mortier, la position et le degré de corrosion des armatures et le degré d'altération 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. Étant donné que la majorité des instruments ont été développés pour l'investigation des propriétés et dégâts de grandes constructions en béton, les approches ont été adaptées à l'analyse des structures plus fines et fragiles des dalles de verre. Les instruments ont été évalués en termes de facilité d'application, de coûts et d'avantages. Pour la caractérisation chimique du mortier et des verres, nous avons employé une approche micro-invasive à l'aide de petits échantillons analysés par microscopie électronique à balayage et micro-fluorescence X portable.

Le deuxième but du projet, non moins important, est de déterminer l'état de conservation des dalles de verre examinées en combinant les méthodes testées et l'analyse visuelle. Les investigations sont accompagnées d'une documentation photographique détaillée des vitraux, qui servira de base au suivi futur. Cette approche spécifiquement adaptée à l'étude de la dalle de verre devrait non seulement faciliter la surveillance de l'état de conservation (monitoring) des œuvres *in situ*, mais également servir de base pour l'élaboration de concepts de préservation, qui tiennent compte de l'intégrité et de l'authenticité historiques, matérielles et techniques des vitraux en dalle de verre étudiés.

Le plan initial prévoyait de réaliser l'étude sur cinq sites dans les cantons de Fribourg et du Jura. Cependant, malgré une recherche intensive et prolongée de soutien financier, seule une partie du budget prévu pour le projet a pu être obtenue. Après avoir consulté les partenaires qui avaient assuré d'augmenter leurs prestations propres, nous avons décidé de limiter les investigations à deux objets de référence : le cycle des vitraux en dalle de verre de Fernand Léger à Courfayvre (JU) et le grand vitrail en dalle de verre d'Alexandre Cingria au Couvent des Cordeliers à Fribourg (FR). Le projet a été lancé le 20 août 2019 avec une première séance de travail commune à Fribourg. Les premières investigations à Fribourg ont eu lieu la même année ; les investigations à Courfayvre,

¹⁴ Voir par ex. MARIE-VICTOIRE 1996.

prévues au printemps 2020, ont dû être reportées à l'été 2020 en raison du premier « lockdown » ; malgré d'autres contraintes massives, le projet a pu être achevé au printemps 2021.

Ce rapport présente une synthèse des résultats d'analyses *in situ* et de laboratoire et discute la praticité et l'efficacité de l'approche développée. Le rapport s'appuie sur les recherches de Sophie Wolf et d'Agathe Dumont (recherches historiques et techniques et analyse visuelle) de Johannes Hugenschmidt (non-destructive testing) et de Christophe Gosselin (analyse des matériaux et non-destructive testing) ; les rapports complets des derniers sont annexés.

3 Historique et description des dalles de verre investiguées

3.1 Vitrail en dalle de verre d'Alexandre Cingria au Couvent des Cordeliers, Fribourg

3.1.1 Historique

Le grand vitrail d'Alexandre Cingria est réalisé dans le cadre des travaux de restauration de l'église entre 1936 et 1938. Ces travaux se font à l'initiative du père Maurice Moullet, supérieur de la Confrérie. Ils ont pour but, à la fois de moderniser le décor de l'église pour l'inscrire dans le mouvement de renouveau de l'art sacré, très prégnant à l'époque, et de remettre en valeur le retable du Maître à l'œillet, redécouvert à cette période. Pour mener à bien ces objectifs, le père Moullet s'entoure d'artistes, dont la majorité fait partie du groupe de Saint-Luc. Le décor de l'église est alors pratiquement intégralement repensé et les apports du XIX^e siècle sont retirés au profit d'œuvres contemporaines. La pièce maîtresse de ce projet est le vitrail d'Alexandre Cingria conçu pour la fenêtre axiale de l'église et abordant le thème de la Pentecôte (fig. 4).



Fig. 4 : Vue du chœur de l'église en 1971 avec la dalle de verre d'Alexandre Cingria et les vitraux néogothiques en place. © Archives du Couvent des Cordeliers Fribourg.



Fig. 5 : Vue du chœur de l'église après la dépose des vitraux (avant le montage des rideaux). La photo montre le nouveau remplage de la fenêtre centrale.

Il est exécuté par Jean Gaudin dans la nouvelle technique de la dalle de verre. Le vitrail est installé en 1938. Il est alors vivement critiqué par les contemporains : les couleurs que confère cette technique sont jugées trop éclatantes, le thème illisible et le sujet sacré non respecté. Cependant, après « la polémique habituelle autour des œuvres de Cingria »¹⁵, le vitrail est finalement considéré comme un chef-d'œuvre.



Fig. 6 : Projet pour les vitraux en dalle de verre des trois fenêtres du chœur d'Alexandre Cingria. Gouache sur papier. Couvent des Cordeliers Fribourg. Photo Y. Eigenmann.

Cingria et le père Moullet avaient également prévu la réalisation de vitraux pour les deux fenêtres latérales du chœur, mais le projet n'a jamais été concrétisé. « À la mort d'Alexandre Cingria, en 1945, le R.P. Moullet décide de suspendre définitivement le projet d'exécution des deux vitraux de l'abside »¹⁶. Les seuls témoins restants sont trois dessins préparatoires aujourd'hui conservés au couvent (fig. 6).

De 1974 à 1991, l'église fait l'objet d'une nouvelle rénovation considérée nécessaire par l'état de délabrement de l'extérieur et de l'intérieur. Dans la quête d'authenticité, les travaux visent à revenir à un état antérieur, jugé plus pur et plus apte à mettre en valeur le retable du Maître à l'œillet. Au cours de ces transformations, la majorité des ajouts des XIXe et XXe siècles sont effacés, y compris le vitrail en dalle de verre de Cingria, déposé en 1978, que l'on estimait occulter le retable. Dans le même mouvement, les deux vitraux néogothiques du chœur sont retirés et remplacés – comme l'œuvre de Cingria – par des verrières transparentes (fig. 5). Les remplages de la fenêtre centrale ainsi que les têtes des lancettes des trois fenêtres – épurés probablement pendant les transformations de l'église à l'époque baroque – sont reconstitués dans l'état supposé de l'époque gothique. De lourds rideaux sont finalement installés pour atténuer la luminosité dans le chœur et protéger le retable des effets néfastes d'une exposition à la lumière directe et aux rayons ultraviolets.

¹⁵ RUDAZ 1997, 14.

¹⁶ MEER 2002, 65.

3.1.2 Description

Il s'agit d'un vitrail tripartite monumental d'environ six mètres de haut et de deux mètres de large (fig. 7). Il est composé de 24 panneaux, dont 21 étaient montés dans les trois lancettes en arc brisé et trois dans les oculi des remplages. Le thème représente la *Pentecôte*. La Vierge, au centre, est agenouillée les bras croisés. Elle est entourée de deux apôtres debout ayant les bras levés. Les têtes sont surmontées de flammes occupant toute la hauteur du vitrail. Les oculi représentent la Trinité: Dieu le Père (à gauche), le Fils (à droite) et le Saint-Esprit (en haut). Les teintes des verres sont dans les nuances jaune (flammes), bleu et rouge (personnages et fond).



Fig. 7 : Montage numérique du vitrail. Vue intérieure en lumière transmise (à gauche) et en lumière réfléchie (à droite).
Photos S. Wolf, montage D. Stettler.

Le vitrail a été déposé en 1978 ; les 24 panneaux sont aujourd’hui conservés aux archives du Couvent des Cordeliers (fig. 8). Leurs épaisseurs varient entre 2 et 4 cm. Ils sont moulés individuellement. Chaque bord est rehaussé (à l’intérieur) et forme 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 plus larges sont sculptées (en relief) afin d’accentuer les formes (fig. 9). La face externe des panneaux, donc la face inférieure lors du coulage, est légèrement texturée ; elle peut avoir été créée en versant le béton sur une surface recouverte de textile (fig. 10). Ce mortier au ciment est identique à celui de la dalle de verre.



Fig. 8 : Panneaux du vitrail en dalle de verre entreposés aux archives du Couvent des Cordeliers Fribourg. Le panneau au milieu présente l’empreinte d’une barre de fer dans la feuillure du bord inférieur (ou supérieur).

Les panneaux étaient montés dans la feuillure de l’embrasure et des meneaux verticaux de la fenêtre et scellés avec un coulis de ciment rapide (fig. 11, voir également chapitre 5.3.1). Le poids des panneaux était probablement supporté par des barres d’armature passant dans les rainures réalisées dans les bords inférieurs et supérieurs de chaque panneau. Les barres de fer avaient un diamètre de 5 mm et étaient enrobées dans du mortier de ciment et probablement ancrées des deux côtés dans la maçonnerie ; il n’en reste que les traces de rouille dans le mortier de pose (voir fig. 8). Des empreintes dans le mortier de pose suggèrent que les panneaux étaient tenus par des feuillards à l’intérieur.



Fig. 9 : Face interne d'un panneau, rugueuse et sculptée en relief.



Fig. 10 : Face externe d'un panneau, légèrement texturée.

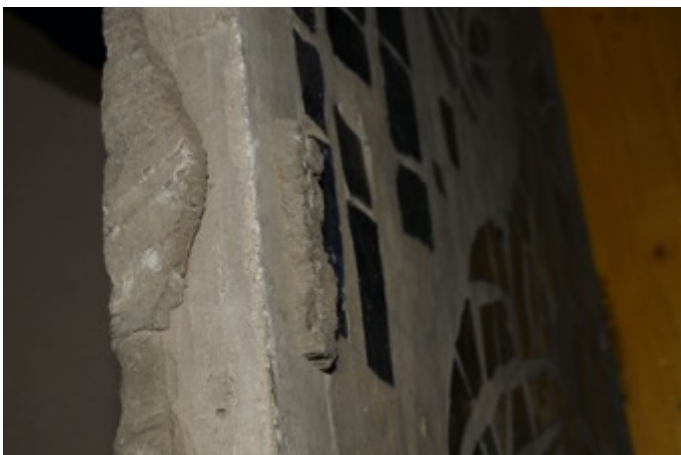


Fig. 11 : Traces du scellement latéral des panneaux avec ciment rapide. Restes de ciment sur les bords d'un panneau (face externe et face supérieure).

3.2 Cycle des vitraux en dalle de verre de Fernand Léger à l'église de Courfaivre (JU)

3.2.1 Historique

Les débuts de l'église St-Germain d'Auxerre de Courfaivre remontent au XIII^e siècle. À l'origine, il s'agissait d'une église à nef unique et à chœur rond avec une fausse voûte d'arête. Les épais murs latéraux étaient percés de fenêtres rondes. En 1953, suite à la croissance de la communauté catholique de Courfaivre, la paroisse décide d'agrandir l'église. La rénovation est confiée à l'architecte jurassienne Jeanne Bueche (1912-2000). Le bâtiment étant situé sur le flanc d'une colline, seule une extension latérale de l'église peut être envisagée. L'architecte décide de bâtir des nouveaux collatéraux. Leur construction en béton armé autoportante permet la création de grandes verrières le long des murs latéraux des deux bas-côtés. Jugeant que la décoration de l'église fait partie intégrante de l'architecture, Jeanne Bueche dédie une partie importante du budget à la réalisation de grandes fenêtres colorées en technique de dalle de verre (fig. 12).



Fig. 12 : Vues extérieure et intérieure de la façade sud de l'église de Courfaivre.

Pour leur création, elle fait appel à Fernand Léger qui avait auparavant conçu les fenêtres en dalle de verre à l'église du Sacré-Cœur d'Audincourt en France. La réalisation des dalles de verre est confiée à l'atelier de verriers Aubert et Pitteloud de Lausanne (fig. 13).



Fig. 13 : Signatures de l'artiste et de l'atelier sur les dalles de verre à Courfaivre (côté sud, galerie).

Le programme iconographique de l'ensemble des vitraux figuratifs est décidé entre l'architecte et le curé de l'église et élaboré en étroite collaboration avec l'artiste. 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. Pour le curé il est important que les vitraux reflètent les valeurs profondes de la foi catholique. Celles-ci sont parfaitement illustrées dans le Credo. Cette thématique a été divisée en cinq grands thèmes : Dieu le père, la vie du Christ, le Saint-Esprit, l'Église et la Vie Éternelle. Les thèmes se poursuivent, dans le sens horaire, dans les dix médaillons. Chacun est encadré de vitraux abstraits qui reprennent les motifs de fond et leurs couleurs. Le cycle commence au sud-est (SIII) et se termine au nord-est (NIII). Les deux grands vitraux du chœur de l'église forment un cycle à part symbolisant l'Eucharistie à travers deux sujets : la Multiplications des Pains (NII) et les Noces de Cana (SII) (fig. 14). L'expressivité des vitraux de Fernand Léger réside dans la combinaison de symboles anciens avec des compositions abstraites. Le réseau en « béton » fait partie intégrante du dessin et renforce la lisibilité des motifs. Les fenêtres des bas-côtés sont décorées de vitraux abstraits (fig. 15). Les dalles de verre sont montées avec un mastic spécial dans les ouvertures créant ainsi une entité matérielle entre vitraux et structure en béton et de véritables murs lumineux.



Fig. 14 : Vitraux du chœur.



Fig. 15 : Dalle de verre abstraite dans le bas-côté nord.



Fig. 16 : Dalle de verre installée en tant que fenêtre à soufflet.

Afin de pouvoir aérer l'église, plusieurs panneaux des vitrages abstraits dans les bas-côtés et dans la claire-voie ont été installés comme fenêtres à soufflet et montés dans des cadres métalliques avec un simple dispositif d'ouverture (fig. 16).

L'église est répertoriée sous le numéro KGS-DS-Nr 3493 dans l'inventaire des biens culturels de l'Office fédéral de la protection de la population OFPP en tant qu'objet d'importance nationale (catégorie A).

3.2.2 Description des vitraux en dalle de verre analysés

Le deuxième médaillon sur la façade sud (SIV) illustre l'Annonciation (fig.17). La Vierge y est représentée sous les traits d'une jeune femme, une main, sortant de nuées, venant se poser sur son front, symbolise le Saint-Esprit. À gauche de la Vierge, la présence d'une branche fleurie symbolise la prophétie d'Isaïe (Is 7.14 et Is 11.1).



Fig. 17 : Vues intérieure et extérieure de l'Annonciation (façade sud).

Le médaillon a un diamètre de 161 cm et a été moulé 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. Des traces de peinture noire, probablement appliquée pour accentuer les traits des visages et modeler les formes, sont visibles en surface (fig. 18). La face interne du panneau correspond à la face supérieure de la dalle de verre ; elle est légèrement rugueuse. Il est monté avec un mortier de pose dans la baie, une structure en béton armé moulé, depuis l'extérieur. Le médaillon est tenu par un cadre rond métallique avec un profil en forme de « L » vissé dans la structure (fig. 19).



Fig. 18 : Marques de plis sur la face externe du médaillon et traces de peinture noire. Fig. 19 : Cadre métallique vissé dans la structure de la fenêtre.

Le grand vitrail sur la baie nord-est du chœur (nI) représente une allégorie de l'Eucharistie : la *Multiplication des pains* (fig. 20). Elle est symbolisée par deux mains tendues descendant du haut du vitrail, duquel tombent des pains et des poissons. Le bas de vitrail est quant à lui occupé par des flammèches, représentant l'herbe sur laquelle l'assistance est assise. Des taches de couleurs viennent mettre en valeur les pains tombants, donnant ainsi une impression d'abondance.

Le vitrail est moulé en un seul panneau de 3.06 m de haut pour 1.04 m de large. Il est monté avec un mortier de pose dans la feuillure de la baie depuis l'intérieur et scellé avec un mortier de pose (fig. 21). La face externe du panneau correspond à la face inférieure lors du démoulage de la dalle de verre. Aux endroits où la peau de surface est restée intacte, la surface est lisse et montre des « marques de plis » similaires à celles du médaillon (fig. 22).



Fig. 20 : Vues intérieure et extérieure de la *Multiplication des pains*.



Fig. 21 : Détail du montage au mortier.



Fig. 22 : Détail de la surface externe texturée.

4 Méthodes

4.1 Examen visuel

L'examen à l'œil nu est une méthode indispensable et le point de départ de l'analyse de l'état de conservation des vitraux en dalle de verre. En même temps, il est la base des analyses non destructives et micro-invasives. Combinées, les différentes approches permettent de mieux caractériser les matériaux et comprendre leurs dommages.



Fig. 23 : Échafaudage monté sur la façade sud à Courfayvre.

Sur les vitraux en dalle de verre examinés, nous avons recensé et cartographié de manière systématique les défauts et altérations visibles : fissures et pertes dans le béton, fers d'armatures déchaussés, efflorescences de sels, verres altérés ou brisés. Étant donné que le vitrail d'Alexandre Cingria à Fribourg a été déposé en 1978 et que les panneaux sont entreposés dans les Archives du Couvent, nous avons étudié et documenté tous les panneaux du vitrail et réalisé des analyses détaillées sur plusieurs panneaux choisis. À

Courfayvre, nous avons, d'une part, examiné l'état de conservation global de toutes les dalles de verre d'accès facile (rez-de-chaussée et galerie) et fait une analyse détaillée de deux dalles de verre auxquelles nous avons pu accéder par des échafaudages montés à l'extérieur (fig. 23). Il s'agit de la fenêtre nord-est du chœur (Multiplication des pains) et d'un médaillon sur la façade sud (Annonciation).

4.2 Documentation photographique

Les panneaux du vitrail en dalle de verre d'Alexandre Cingria (Fribourg) ont été photographiés individuellement avec un équipement professionnel NIKON D700. Pour chaque panneau, il existe une image de l'intérieur et de l'extérieur en lumière réfléchie ainsi qu'une image de l'intérieur en lumière transmise. La documentation photographique a permis de faire une reconstitution virtuelle du vitrail déposé. À cause de l'accès limité, les deux vitraux en dalle de verre étudiés à Courfaivre ont été photographiés en détail depuis l'extérieur seulement.

Dans les deux cas, des zones de référence ont été définies et photographiées en détail. L'ensemble des photos servira de base pour la surveillance future, c'est-à-dire la vérification de l'état et du développement des dommages observés tels que la largeur et longueur des fissures dans le béton et des fers apparents.

4.3 Analyses non invasives *in situ*¹⁷

4.3.1 L'analyse à l'aimant

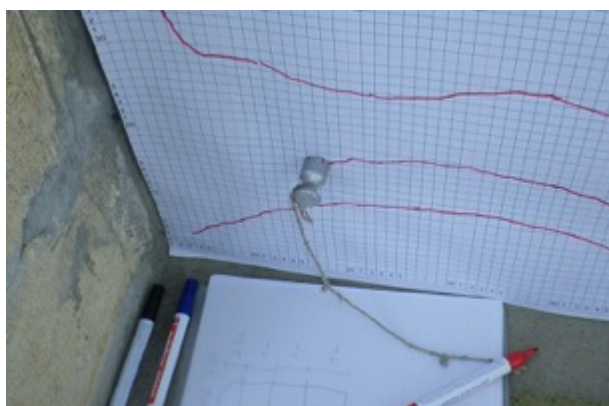


Fig. 24 : Aimant fort pour la localisation des fers d'armatures.

Un aimant puissant, guidé à la main sur la surface du béton armé, convient pour la détection d'armatures proches de la surface (fig. 24). Les expériences menées au laboratoire ont montré que les barres d'armature de diamètre habituel peuvent généralement être localisées à une profondeur de 15-20 mm sous la surface. L'application aux dalles de verre était donc prometteuse en raison de leur épaisseur limitée. L'aimant a été passé à la main sur la surface des dalles de verre examinées. La position des fers d'armature, indiquée par

une adhérence forte de l'aimant, a été marquée directement sur un papier fixé à la surface. L'aimant est la moins chère des méthodes non invasives utilisées dans le projet. Le coût est de quelques francs.

¹⁷ Pour de plus amples informations sur les méthodes non invasives et leur application dans le projet, voir chapitre 1 du rapport de Johannes Hugenschmidt en annexe.

4.3.2 Géoradar

Le géoradar ou radar à pénétration de sol (RPS) est une méthode géophysique utilisant le principe d'un radar pour étudier la composition et la structure des sols. Le principe de fonctionnement est assez simple : un signal électromagnétique est émis par une antenne (émetteur). Le signal est réfléchi sur les diverses interfaces présentes et enregistré par une autre antenne (récepteur) (fig. 25).

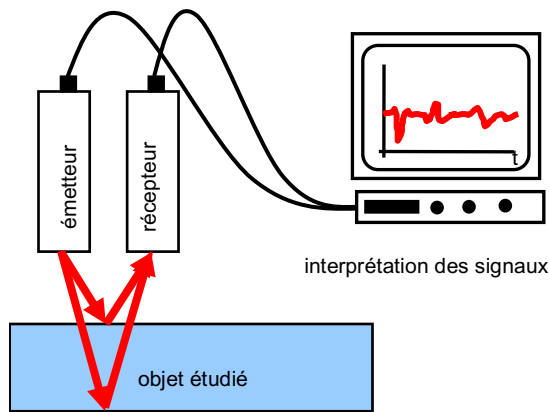


Fig. 25 : Principe de fonctionnement de l'analyse avec géoradar.

La méthode est extrêmement polyvalente et peut être également utilisée, entre autres, pour l'analyse non invasive des bâtiments.

Dans le contexte de ce projet, les mesures de géoradar visaient à localiser les armatures, à déterminer l'épaisseur des dalles de verre et à identifier les hétérogénéités du béton, par exemple en raison de niveaux d'humidité variables ou de dommages structurels. En raison de l'épaisseur des fenêtres et des dimensions limitées des dalles de verre étudiées, une étude tridimensionnelle, à haute fréquence d'antenne, a été réalisée.

Le coût de l'instrument utilisé dans ce projet est supérieur à 30'000 CHF, mais des équipements plus simples sont disponibles sur le marché pour environ un tiers du prix. La *Fachstelle Zerstörungsfreie Prüfung ZfP* de la *Fachhochschule Ost*, dispose d'une concession de l'Office fédéral de la communication (OFCOM) pour l'exploitation légale du système radar dans toute la Suisse.

4.3.3 Analyse avec profomètre à induction

Le profomètre à induction est principalement utilisé pour la détection et la localisation des armatures dans le béton. Le principe est basé sur un champ électromagnétique (champ primaire) généré par une bobine. Si aucun objet conducteur d'électricité n'est présent dans l'objet, le champ généré par la bobine est capté par une seconde bobine. Cependant, des objets électriquement conducteurs comme des barres d'armature, qui se trouvent à proximité des bobines, provoquent un champ électromagnétique secondaire. Dans ce cas, la deuxième bobine capte la superposition des champs primaire et secondaire (fig. 26).

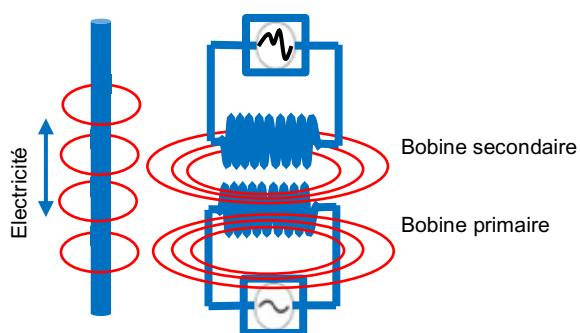


Fig. 26 : Principe de fonctionnement d'un profomètre à induction.

En règle générale, les fers d'armatures peuvent être localisés jusqu'à une profondeur d'environ 10 cm. La taille et la forme du capteur et les algorithmes utilisés pour évaluer les données sont généralement optimisés pour l'étude des armatures rectangulaires dans les structures en béton. La majorité des appareils disponibles dans le commerce ne sont donc pas parfaitement adaptés à

l'étude des dalles de verre qui présentent des réseaux irréguliers. Pour cette raison, quatre instruments différents ont été testés dans le cadre du projet. Le plus simple était un détecteur de câbles bon marché coûtant environ 30 CHF. Les trois autres étaient des appareils professionnels dotés de capteurs de différentes longueurs et d'algorithmes complexes pour l'évaluation et la visualisation des résultats. Il s'agit des appareils suivants : Proceq Profometer 6, Profometer5+, et Ferroscaan PS200. Leur coût est supérieur à 10 000 CHF.

4.3.4 Mesure de potentiel électrique (Potentiel demi-cellules électrochimique)

La méthode est largement utilisée dans l'identification des processus de corrosion dans les constructions en béton armé. Le principe de la méthode est basé sur le fait que les armatures corrodées développent un potentiel plus faible que les armatures non corrodées. Pour les mesures, il faut normalement établir une connexion électrique avec les armatures. Cette connexion est réalisée en exposant une barre de fer et en perçant un trou pour insérer un connecteur. Une électrode est ensuite utilisée pour balayer la surface du béton afin de mesurer la différence de potentiel entre le point mesuré en surface du béton et l'électrode de référence connectée à l'armature. Dans cette constellation, les zones présentant des différences de potentiel fortement négatives (plusieurs centaines de mV) indiquent que la corrosion y est en cours. Il est également possible de mesurer la différence de potentiel entre un point à la surface de la fenêtre et une masse (mise à la terre d'une prise).

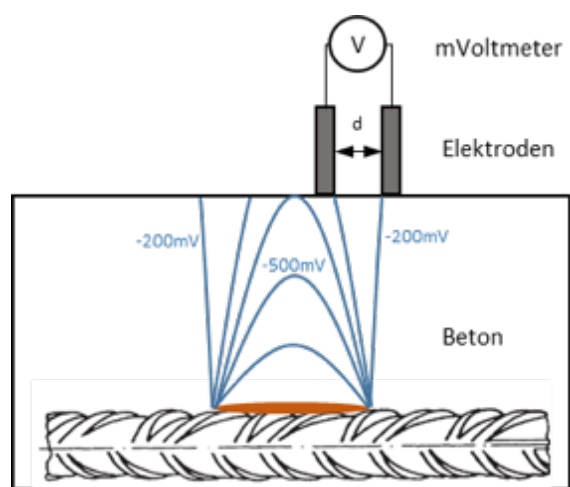


Fig. 27 : Principe de l'analyse de potentiel électrochimique avec une distance fixe entre les électrodes.

Comme l'examen des œuvres devait être effectué de manière non invasive et la mise à terre de l'électrode n'était pas possible, les différences de potentiel ont été mesurées directement sur la surface des dalles de verre avec deux électrodes à une distance fixe de 10 cm (fig. 27). La procédure a été filmée afin que les différences de potentiel mesurées puissent ensuite être réassignées avec les positions respectives. L'inconvénient de cette approche est que les signes – différences de potentiel négatif ou positif – perdent leur signification. En outre, il n'existe pas à ce jour de référentiel pour ces mesures.

4.3.5 Mesures de la résistivité

La résistivité est une constante matérielle dépendant de la température ; sa détermination est une méthode géophysique standard utilisée pour différencier les roches près de la surface. Appliquée à des structures en béton, la méthode peut fournir des informations sur la présence d'armatures, sur la carbonatation du béton ainsi que sur différentes teneurs en humidité du béton.

Théoriquement, la résistivité d'un matériau peut être déterminée en appliquant une tension à deux points et en mesurant le courant. En pratique, il faut tenir compte du fait que la résistivité mesurée

est considérablement influencée par la résistivité de contact entre l'électrode et le matériau. Ce problème peut être évité grâce à une disposition à quatre points (fig. 28).

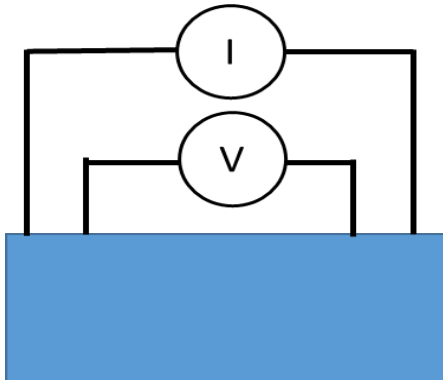


Fig. 28 : Principe de mesure de la résistivité avec une disposition à quatre points.

4.3.6 La thermographie active et passive

La thermographie est une méthode permettant de mesurer et enregistrer le rayonnement thermique émis par une structure (rayonnement infrarouge : $6 \cdot 10^{12}$ Hertz). Dans le secteur de la construction, la thermographie est utilisée pour détecter les ponts thermiques, les défauts de matériaux tels que les fissures ou les cavités, ou les différences d'humidité dans les matériaux de construction. Les caméras thermographiques sont disponibles sur le marché à des prix allant de quelques centaines de francs à environ 100 000 francs.

La méthode a été testée à Fribourg ainsi qu'à Courfaivre. À Fribourg, trois panneaux individuels ont été chauffés activement avec une couverture chauffante à une température de 35°C (fig. 29). Ensuite, une image thermique par minute a été enregistrée pendant une heure afin de visualiser les éventuelles différences thermiques. À Courfaivre, l'approche était « passive » : la caméra a été placée dans la galerie de l'église devant le médaillon de la Résurrection (fig. 30). Ensuite, comme à Fribourg, une image thermique par minute a été enregistrée pendant une heure.



Fig. 29 : Thermographie « active » à Fribourg. Réchauffement préalable d'un panneau avec une couverture chauffante.



Fig. 30 : Thermographie « passive » à Courfaivre. Mesure durant la journée depuis la galerie (Résurrection).

4.3.7 Examen aux ultrasons (avec jauge d'épaisseur ultrason)

L'examen aux ultrasons est une méthode qui permet de localiser des défauts (fissures, lacune, etc.) et hétérogénéités du matériau ainsi que d'effectuer des mesures d'épaisseur. Similaire au géoradar, la méthode se base sur la détection des différences des temps de propagation entre les échos réfléchis par les différentes couches ou défauts présents. Les objets peuvent être examinés en modes réflexion ou transmission. En mode réflexion, il est possible de déterminer l'épaisseur d'une structure en béton et de localiser des armatures intégrées. En « calibrant » la vitesse de propagation des ondes avec des valeurs estimées ou déterminées in situ, il est possible d'obtenir des épaisseurs absolues.

La mesure en mode transmission est principalement utilisée pour déterminer la vitesse de propagation du signal dans le matériau, ce qui peut fournir des informations sur ses diverses propriétés, telles que sa densité, sa porosité et son homogénéité, ainsi que sur la présence de microfissures.

4.4 Analyses micro-invasives

4.4.1 Analyses par microscopie électronique à balayage (MEB)

Afin d'obtenir des informations sur la microstructure et la composition du béton des dalles de verre étudiées, des analyses par microscopie électronique à balayage (MEB) couplé à une sonde EDS ont été réalisées sur trois petits échantillons de mortier (0.5–1 cm). En outre, deux petits fragments de verre du vitrail de Cingria ont été analysés pour mieux comprendre les raisons de la faible résistance chimique des verres de couleur orange et jaune dans ce vitrail. Tous les échantillons analysés étaient de fragments disponibles, c'est-à-dire déjà détachés, sans qu'aucun autre prélèvement destructif ne soit fait sur les panneaux étudiés. Les analyses des trois fragments de mortier ont été réalisées sur des sections polies (imprégnation par résine époxy préalablement au polissage mécanique. Les deux fragments de verre ont été analysés sur leur surface brute, sans imprégnation ni polissage).

Les analyses ont été faites en fonction de la disponibilité des échantillons de matériaux et n'ont donc pas été systématiques sur les deux sites. Le tableau suivant résume les différentes analyses du béton et du verre.

Site	Microscopie électronique à balayage MEB	Fluorescence aux rayons X avec XRF portable
Fribourg	1 fragment de mortier de pose (CF-M1) 1 fragment de mortier (CF-M2) 2 fragments de verre orange (CF-V1 et CF-V2)	Panneaux no. 3a face interne, no. 3c face externe, et no. 9b face externe
Courfaivre	1 fragment de mortier du médaillon « La Multiplication des Pains » (LC)	

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une méthode de laboratoire permettant de décrire la microstructure et de déterminer la composition chimique élémentaire des matériaux inorganiques tels que le mortier et le verre. Étant donné que la concentration d'éléments légers comme le sodium – constituant majeur du verre – ne peut pas être déterminée ou est « sous-estimée » par MEB couplé à une sonde EDS, les résultats d'analyse des fragments de verre ne sont

pas quantitatifs et ne reflètent que le type du verre (et le colorant utilisé) et non pas sa composition exacte.

4.4.2 Analyse par fluorescence X avec instrument portable



Fig. 31 : Analyse de la composition chimique du verre à l'aide d'un XRF portable, modèle Thermo Scientific NitonXLp 30 (Geotest S.A.).

utilisés pour colorer le verre. Malheureusement, les mesures n'ont pas donné des résultats fiables et n'ont pas été interprétées.

Dans un essai-pilote, nous avons analysé une douzaine de pièces de verre de différentes couleurs du vitrail de Cingria par fluorescence X (XRF) *in situ* (fig. 31). Les analyses ont été réalisées avec un appareil portable du modèle Thermo Scientific NitonXLp 300. L'instrument ne permet pas l'analyse en atmosphère d'hélium ; les éléments légers ne peuvent donc pas être détectés. Conscients de cet inconvénient, nous avons néanmoins tenté d'identifier les éléments (oxydes métalliques)

5 Résultats et discussion

5.1 Résultats de l'examen visuel

5.1.1 Grand vitrail en dalle de verre d'Alexandre Cingria (Fribourg)

Tous les panneaux montrent des fissures d'épaisseurs variables entre environ 0.1–0.5 mm. En règle générale, elles passent entre les angles des verres adjacents (fig. 32). La plupart des fissures se manifestent sur la face externe du panneau. Elles semblent superficielles et sont réparties de manière uniforme sur toute la surface. Ces fissures sont certainement apparues lors de la prise du béton et ne présentent pas de danger pour la conservation de la dalle de verre. Certaines fissures plus importantes, principalement visibles sur la face interne des panneaux sont traversantes. Elles se situent majoritairement à proximité des bords et entre les verres très altérés.

Les bords des panneaux sont très endommagés à de nombreux endroits. Le béton y présente des éclats et des pertes ; les fers sont exposés et corrodés. Les dégâts ont très probablement été engendrés lors de la dépose du vitrail (fig. 33).



Fig. 32 : Fissure entre verres adjacents.

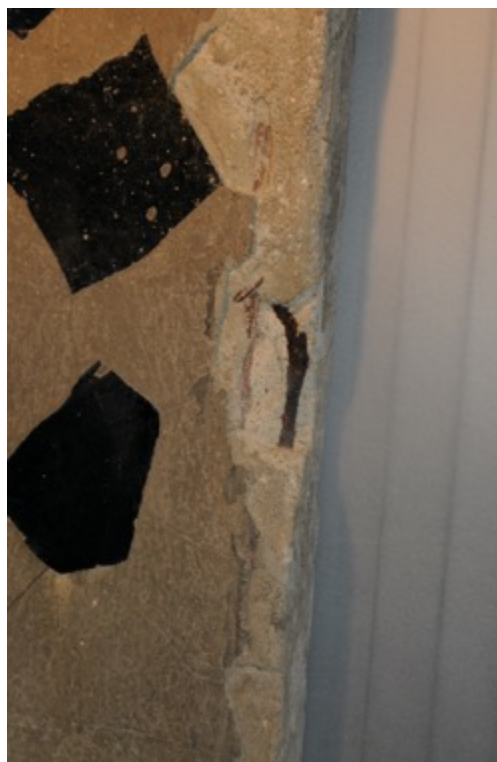


Fig. 33 : Bord endommagé d'un panneau.

À l'intérieur des panneaux, les fers apparents sont rares ; leur apparition est liée d'une part au faible enrobage, d'autre part à l'éclatement superficiel du béton, qui génère à son tour la corrosion des fers proches de la surface. Un léger écaillage du béton peut être également observé dans les zones autour des verres très altérés (fig. 34). Il est essentiellement en lien avec la dégradation de ces verres peu stables et la formation des sels. L'efflorescence de sels est particulièrement visible et plus marquée sur la face externe, où elles forment des auréoles concentriques autour des verres particulièrement altérés de couleurs jaune, orange et rouge (fig. 35). Sur la face interne, l'efflorescence de sels se manifeste par un voile blanc en surface (fig. 36).



Fig. 34 : Écaillage du mortier autour de verres altérés.



Fig. 35 : Verre de couleur rouge-orange très altéré.

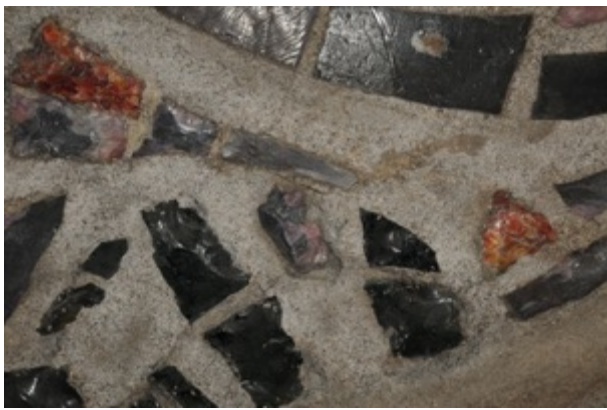


Fig. 36 : Efflorescence de sels sur face interne d'un panneau.



Fig. 37 : Verres de couleur rouge et orange très altérés.

Les verres de couleur rouge orange et jaune semblent être plus sensibles à la détérioration que les verres bleus et verts, qui semblent avoir une composition plus stable et ne sont que légèrement touchés par l'altération (fig. 37). Certains verres bleus et verts sont toutefois très sombres, mais cette couleur est probablement due à la forte coloration du verre.

Les processus d'altération des verres n'ont pas pu être étudiés en détail dans le cadre de ce projet. Pour l'instant, nous devons nous contenter de l'hypothèse que la composition – possiblement la présence de soufre (voir chapitre 5.3.2) – et la faible résistance chimique des verres de couleurs orange, rouge et jaune entraînent l'efflorescence de sels et accélèrent localement la corrosion des armatures et l'altération du mortier.

5.1.2 Cycle des vitraux en dalle de verre de Fernand Léger (Courfainve)

Les phénomènes observés à l'œil nu sur les dalles de verre comprennent :

- des fissures dans le béton de largeur variable (fig. 38)
- un « écaillage » du béton, notamment autour des verres colorés (fig. 39)
- des fers apparents (fig. 40).
- des lacunes dans les joints fins entre verres adjacents (fig. 41)
- des fissures dans les verres (fig. 42)

- des réparations avec différents mortiers du réseau en béton (fig. 43)
- des joints d'étanchéité (en silicone) cassants et craquelés (fig. 44)
- des fissures et pertes dans le mortier de jointure des dalles de verres (fig. 45).

Les fissures sont généralement perpendiculaires aux bords du verre (fig. 46). La largeur des fissures est comprise entre environ 0.1 et 0.5 mm. La plupart des fissures se sont probablement déjà formées lors de la prise du mortier ; certaines se sont légèrement élargies avec le vieillissement du béton, comme le montre la comparaison avec l'analyse de l'état de 1999 (voir ci-dessous). Certaines fissures traversent toute l'épaisseur de la dalle, ce qui en cas de fortes pluies, pourrait permettre à l'eau s'infiltrer à l'intérieur par les fissures¹⁸. Cependant, un tel risque est peu probable en raison du grand surplomb du toit. Les quelques fers exposés ne sont que superficiellement corrodés et n'ont entraîné aucun éclatement du béton. Il semble qu'ils n'aient pas été complètement recouverts par le mortier lors de la coulée des dalles de verre. Le vitrail de la *Multiplication des pains* montre plus de fers apparents ; la couche superficielle du béton est pelée en exposant les fers proches de la surface.



Fig. 38 : Réseau de fissures fines dans le béton.



Fig. 39 : Traces du raclage (flèches rouges).

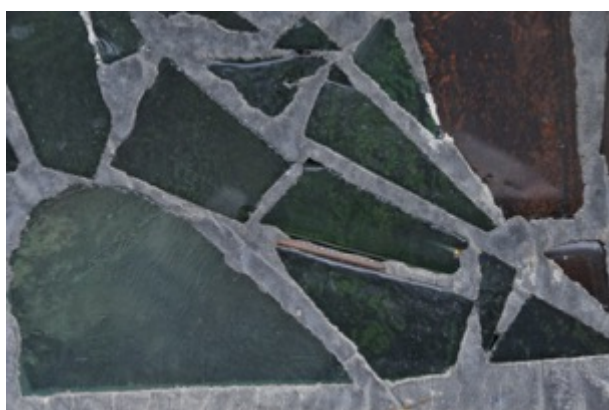


Fig. 40 : Joint étroit avec fer apparent.

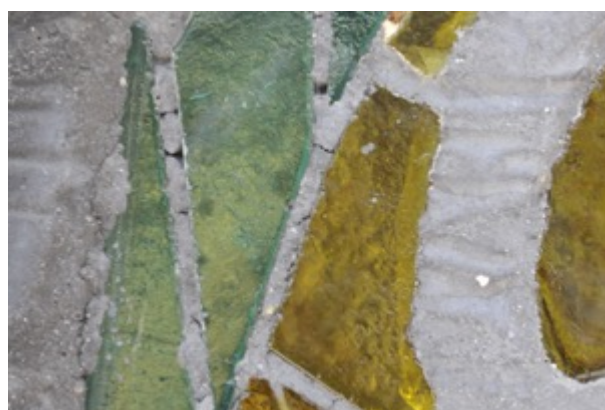


Fig. 41 : Joints étroits pas entièrement remplis avec du mortier.

¹⁸ Lors de l'étude de 1999, de l'eau a été versée sur le médaillon de *la Résurrection* dans le but de tester la perméabilité du béton. Le béton a été complètement imbibé d'eau. Il y a des traces de cet essai (coulures séchées) sur la face interne de la dalle de verre. Ce test simple et révélateur, mais relativement invasif n'a pas été répété dans cette étude.



Fig. 42 : Verre fissuré (ouvrant).



Fig. 45 : Fissure et perte dans le mortier de jointure.



43 : Réparations avec différents mortiers (ouvrant).



Fig. 44 : Joint d'étanchéité en silicone cassant et craquelé.

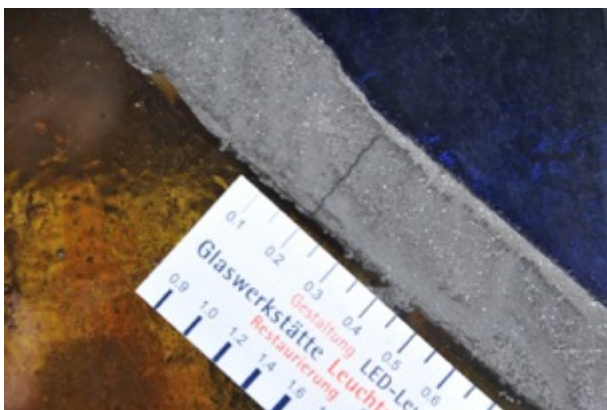


Fig. 46 : Fissures perpendiculaires aux bords du verre.



Fig. 47 : Nid d'insecte dans une lacune dans le joint entre deux verres.



Fig. 48 : Dégât superficiel par impact mécanique.



Fig. 49 : Traces d'eau sur la face interne de la Résurrection.

Les interstices entre les verres rapprochés sont parfois partiellement remplis, laissant des espaces vides et des fentes (voir fig. 41), dont quelques-unes ont été utilisées par les insectes pour fabriquer leurs nids (fig. 47). L'écaillage du béton le long des bords des verres – déjà observé lors de l'étude de 1999 – est vraisemblablement le résultat du raclage du mortier lors de leur fabrication (voir chapitre 1) et ne doit donc pas être interprété comme un dommage (voir fig. 39).

Le verre est stable ; il ne présente pratiquement aucun signe d'altération et seulement quelques fissures et dégâts superficiels par impact mécanique (fig. 48). La majorité des verres endommagés a été observée sur les battants à soufflet où la contrainte mécanique est importante (voir fig. 42).

Les traces d'eau observées sur la face interne du médaillon de *la Résurrection* (fig. 49) sont dues à une expérience réalisée lors de l'enquête de 1999 (voir note 18). Cependant, on trouve également des traces de condensation, notamment sur la surface interne des verres, où elles sont mieux visibles que sur la surface rugueuse du béton.

La plupart des ouvrants présentent des dommages considérables (voir fig. 42 et 43) ; le réseau en béton est fracturé et a été colmaté à plusieurs reprises en utilisant de mortiers différents (ciment, plâtre). Les mortiers de réparation sont également fissurés et se détachent par endroit (fig. 50). Les dégâts sont principalement dus aux contraintes mécaniques induites par le dispositif d'ouverture défectueux. En effet, les ouvrants ne peuvent être fermés qu'avec beaucoup d'élan, ce qui, selon le sacristain, a déjà entraîné la rupture d'un morceau entier d'un panneau du côté nord-ouest (galerie). Pour éviter d'autres dommages, les ouvrants doivent être restaurés dès que possible et le mécanisme d'ouverture réparé. En attendant, il faut éviter d'ouvrir ces fenêtres. Un panneau d'un vitrail abstrait (nef sud) est fondu le long du bord d'un verre (fig. 51). Il semble que la fente est ancienne ; elle s'est possiblement formée lors la prise du béton (tensions causées par la forme du verre ?).

Le mastic des joints en silicone est devenu cassant et craquelé avec l'âge ; les joints vont fuir à moyen terme et doivent être rescellés (voir fig. 44).



Fig. 50 : Mortier de réparation fissuré (battant à soufflet). Fig. 51 : Fente dans le béton (vitrail abstrait, nef sud) .

Deux dalles de verre ont été examinées en détail. Les dommages sont décrits ci-dessous et illustrés dans les relevés correspondants présentés au chapitre 6.2 :

L'Annonciation (fig. 52)



Fig. 52 : Médaille de l'Annonciation.

La surface présente un réseau de fissures de rétraction de longueur et largeur variables (fig. 53 ; voir aussi fig. 38) ; elles sont perpendiculaires ou parallèles aux bords des verres. Le rebord du médaillon présente également des fissures perpendiculaires au bord de la dalle. Les lacunes dans les joints entre les verres sont peu nombreuses et petites (fig. 54). Par endroit, elles ont été colmatées avec du mortier (fig. 55).

Sur certaines zones le béton est écaillé, notamment dans les joints très fins (fig. 56), mais la plupart des pertes superficielles semblent être le résultat du raclage de la dalle de verre après la prise du mortier ; quelques verres montrent les traces du découpage (fig. 57).

La majorité des fers apparents se trouvent dans le pourtour du médaillon ; une barre exposée se situe sur le front de la Vierge (fig. 58).

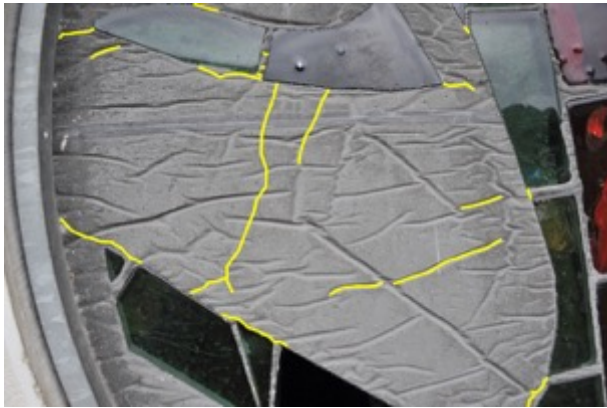


Fig. 53 : Fissures dans le béton.



Fig. 54 : Joint partiellement remplis.



Fig. 55 : Lacune colmatée avec un mortier au ciment.



Fig. 56 : Joint en mortier écaillé.

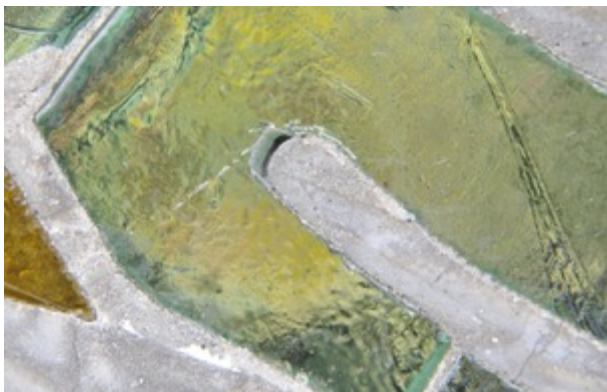


Fig. 57 : Traces du découpage du verre et lacune (non replis avec mortier).



Fig. 58 : Fer apparent sur le front de la Vierge.

La Multiplication des Pains (fig. 59)



Fig. 59 : Médaillon de la Multiplication des pains.

Une grande fissure traverse tout le vitrail dans sa partie médiane. Cette fissure fait quelques millimètres de large, entraînant de faibles pertes de matière (fig. 60 et 61). Elle a été colmatée par endroit avec un mortier plus clair. Il est possible que la fissure se soit produite pendant la fabrication de la dalle de verre ou pendant son transport et/ou son installation. Quatre autres fissures relativement larges sont visibles sur le côté gauche du vitrail. La plus grande se poursuit sur tout le quart bas du vitrail.

La couche superficielle du béton (la peau) est détachée sur quasiment toute la face externe de la dalle, la surface originelle reste cependant visible par endroit (fig. 62). Comme cette « peau » est conservée sur les autres dalles de verre, on peut supposer qu'elle a été perdue lors du moulage de la dalle et non par les processus d'altération.

Le nombre de fers apparents est assez élevé. Ils sont situés sur toute la dalle dans les zones où la surface du béton est pelée (fig. 63). Ils ne sont pas fortement corrodés et ne semblent pas avoir causé l'écaillage ou le soulèvement de la peau, mais sont plutôt le résultat de ces pertes.

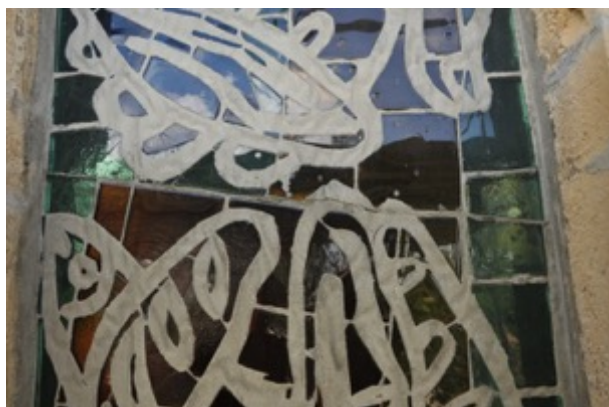


Fig. 60 : Grande fissure médiane.

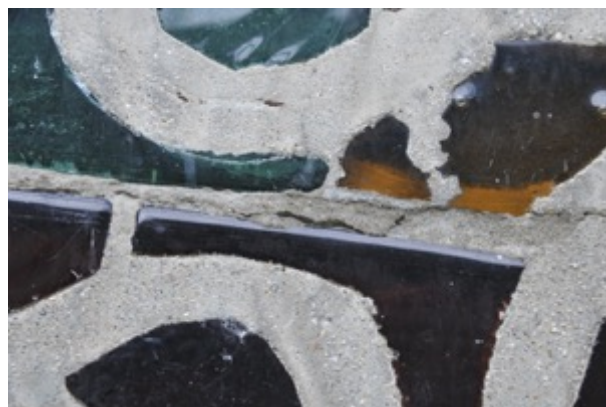


Fig. 61 : Grande fissure médiane (détail).



Fig. 62 et 63 : Peau pelée et fers apparents ainsi que restes de la « peau » texturée.

5.2 Résultats et évaluation des analyses non-invasives¹⁹

5.2.1 Position des armatures

La position des armatures 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 15-20 mm (fig. 64). Les mesures avec le profomètre à induction avec analyse et interprétation automatisées (fig. 65) ainsi qu'avec géoradar donnent également des résultats fiables. L'avantage des deux 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 50 mm (voir ci-dessous) ; en outre, les mesures peuvent être enregistrées et visualisées. Cependant, l'un des inconvénients majeurs des dites techniques est qu'elles sont chronophages. Les appareils sont par ailleurs coûteux et ne peuvent être utilisés que par des spécialistes.

Priorité 1 Aimant : méthode peu coûteuse et simple d'utilisation ; bons résultats jusqu'à une profondeur des armatures de 20-30 mm.

Priorité 2 Profomètre à induction : bons résultats jusqu'à une profondeur des armatures jusqu'à 50 mm ; instrument coûteux ; mesures et évaluation chronophages et nécessitant de l'expérience.

Priorité 3 Géoradar : bons résultats jusqu'à des profondeurs au-delà de 50 mm ; mesures et évaluation des données chronophage ; équipement coûteux ; mesures et évaluation chronophages et nécessitant de l'expérience.

¹⁹ Ces expériences sont résumées ici dans le sens d'une première évaluation et priorisation des méthodes employées ; les résultats détaillés sont présentés dans le rapport de Johannes Hugenschmidt joint en annexe.

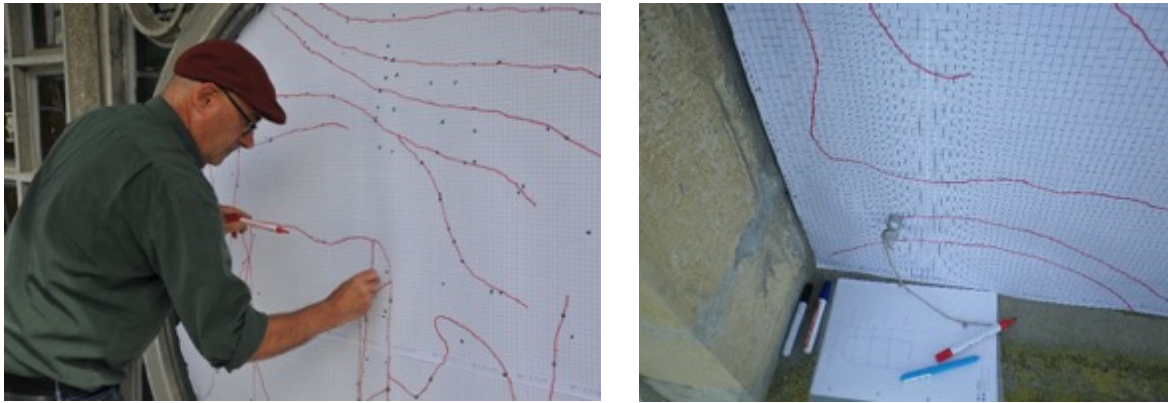


Fig. 64 : Localisation des fers d'armatures avec un aimant puissant. Annonciation (à gauche) ; Multiplication des Pains (à droite).

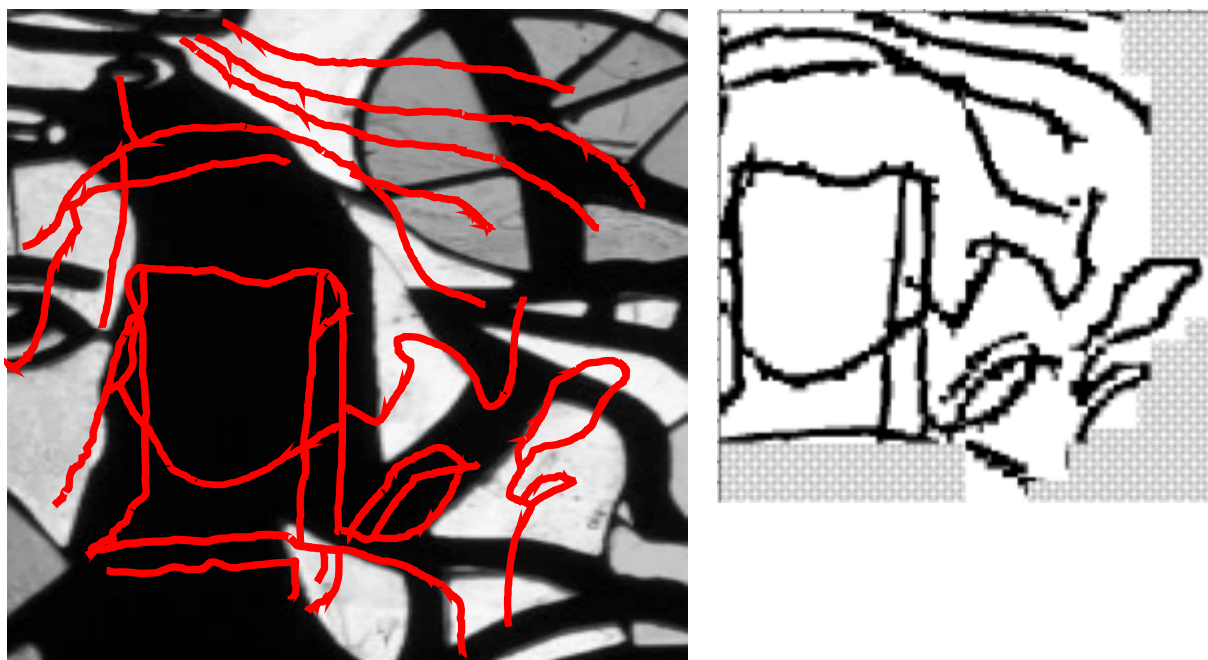


Fig. 65 : Position des armatures dans le médaillon de l'Annonciation déterminée avec un aimant (à gauche) et à l'aide d'un profomètre Hilti Ferroskan PS200 avec analyse et interprétation automatisées (à droite).

5.2.2 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. En règle générale, les fers proches de la surface corrodent plus facilement que ceux bien enrobés de mortier bien que les propriétés du mortier telles que la carbonatation jouent également un rôle décisif (voir chapitre 5.3.1).



Fig. 66 : Mesures avec géoradar (*Annonciation*).

Comme mentionné ci-dessus, l'épaisseur de l'enrobage peut être bien déterminée avec un profomètre à induction – manuel ou automatisé – ainsi qu'avec géoradar (fig. 66). Les mesures – effectués avec les deux techniques sur l'*Annonciation* et la *Multiplication des pains* à Courfaivre – ont fourni des valeurs cohérentes (fig. 67 et 68). À titre d'exemple, les armatures du médaillon de l'*Annonciation* se situent à une profondeur de 20-30 mm. En revanche, dans certaines zones, les fers reposent directement sous la surface (0-10 mm) (voir fig. 67a).

Le profomètre à induction est la moins coûteuse des deux méthodes. Cependant, le coût d'un appareil avec mesure 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 ainsi que des logiciels spéciaux.

Priorité 1 Profomètre à induction automatisé : résultats fiables jusqu'à une profondeur des armatures jusqu'à 50 mm ; instrument coûteux ; mesures et évaluation nécessitent de l'expérience.

Priorité 2 Géoradar : résultats fiables jusqu'à des profondeurs au-delà de 50 mm ; mesures et évaluation des données chronophage ; équipement très coûteux ; mesures et évaluation par des spécialistes.

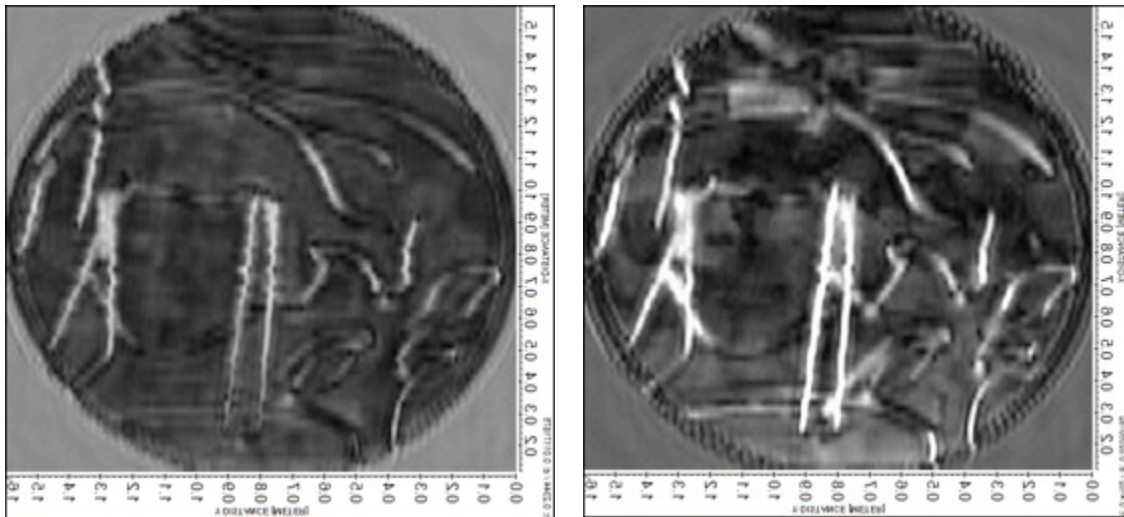


a) Profondeur 0-10 mm

b) Profondeur 10-20 mm

c) Profondeur 20-30 mm

Fig. 67 : Profondeur des armatures dans le médaillon de l'Annonciation déterminée avec un profomètre à induction avec analyse et interprétation automatisées (Hilti Ferrosan PS200).



a) Profondeur 0.01 m

b) Profondeur 0.02 m

Fig. 68 : Profondeur des armatures déterminée avec géoradar (Annonciation).

5.2.3 Corrosion des fers d'armatures



Fig. 69 : Mesures du potentiel électrique sur l'Annonciation.

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 avec armatures, 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 suffisant entre les deux électrodes (fig. 69). L'équipement est peu coûteux, mais les mesures et l'interprétation des données demandent une certaine expérience.

La méthode a été utilisée sur les deux dalles de verre à Courfaivre. Les différences de potentiel enregistrées ont été divisées en deux classes, la première supérieure à 50 mV (jaune) et la seconde supérieure à 100 mV (rouge) (fig. 70). Le choix des deux classes – arbitraires – a pu être validé à l'aide de l'examen visuel : les zones avec des fers apparents et/ou fortement fissurées coïncident relativement bien à celles avec des tensions supérieures à 50 mV (fig. 71). Cependant, les corrélations observées restent vagues. Elles doivent être vérifiées par d'autres mesures sur d'autres objets et la méthode doit être adaptée ou développée si nécessaire.

Priorité 1 Mesure du potentiel électrique : Équipement peu coûteux ; méthode laborieuse et – pour l'instant – peu efficace ; technique nécessitant d'être développée et vérifiée.

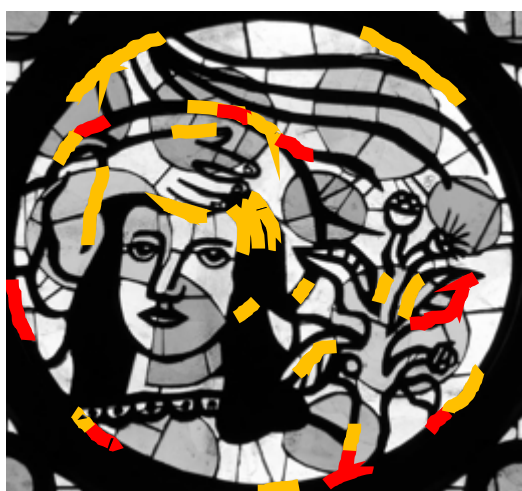


Fig. 70 : A gauche, résultats des mesures du potentiel électrique sur l'Annonciation (rouge: $U > 100$ mV, jaune: $U > 50$ mV)



Fig. 71 : Dégâts observés (rouge : fers apparents, vert : fissures fines, bleu : fissures larges).

5.2.4 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 géoradar (voir tableau ci-dessous).

Position	Ultrason (épaisseur en mm)	Géoradar (épaisseur en mm)
1	24.7	24-25
2	26.8	25-26
3	25.4	24-25
4	24.1	23-24

Les mesures obtenues par ultrasons (fig. 72) sont beaucoup moins chères et plus simples que celles obtenues par géoradar. L'ultrason, cependant, ne permet que des mesures individuelles ; avec géoradar, le profil d'épaisseur d'une dalle de verre entière peut être mesuré et visualisé (fig. 73).

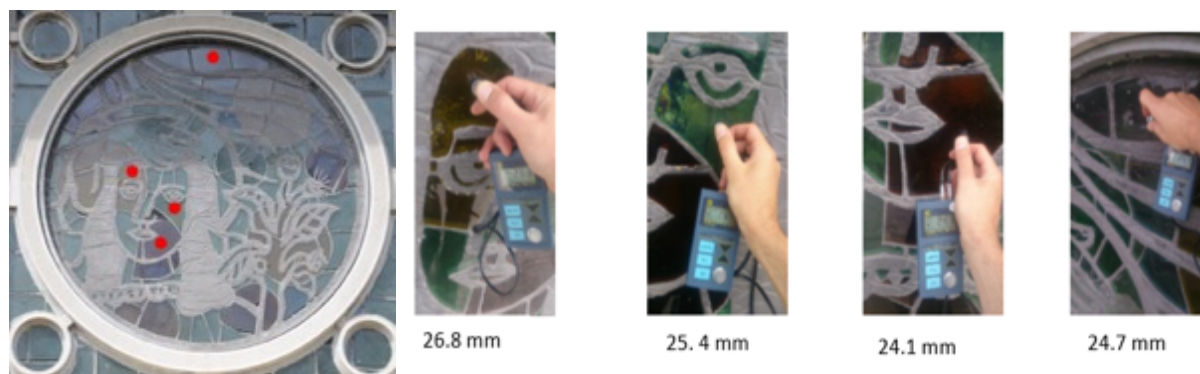


Fig. 72 : Détermination de l'épaisseur avec l'ultrason. Mesure sur quatre points à l'aide d'un instrument TT-10 de TIME Group Inc. (Geotest S.A.).

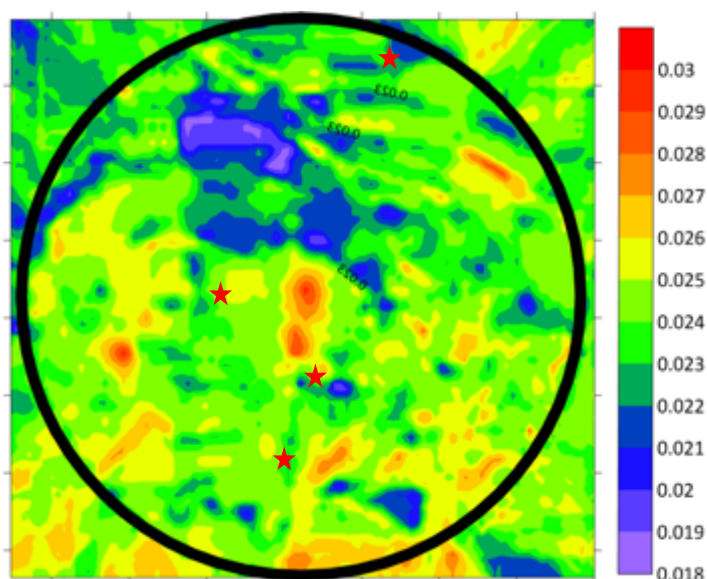


Fig. 73 : Détermination de l'épaisseur avec géoradar (Fachhochschule OST). Les points mesurés par ultrasons sont indiqués avec une étoile.

Priorité 1 - Ultrason : mesures quantitatives après calibration ; sans calibration, les mesures ne fournissent que des résultats semi-quantitatifs ; méthode simple et facile à employer, peu coûteuse.

Priorité 2 - Géoradar : mesures quantitatives après calibration ; sans calibration, les mesures donnent que des résultats bidimensionnels et semi-quantitatifs ; mesures et évaluation des données chronophages, nécessitant des spécialistes ; équipement très coûteux.

5.2.5 Propriétés du béton : fissures, porosité, humidité

La détermination des propriétés du béton est une affaire très complexe ; elle se base normalement 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 les hétérogénéités telles que la densité et la porosité variables du matériau, les zones de fissures et les zones humides. Dans le cadre du projet, différentes méthodes 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 de Cingria, les différences de température entre le verre et le béton sont clairement visibles (fig. 74). On peut également noter des variations de température sur les surfaces du béton (flèche verte). Ces phénomènes – qui ne sont pas liés à la présence d'armatures – pourraient s'expliquer par des hétérogénéités dans le béton, par exemple par une porosité et/ou humidité plus élevée ou la présence de microfissures. Cependant, l'interprétation des images reste difficile et la question ne peut être pas résolue sans investigations supplémentaires.

Les images thermographiques sur les dalles de verre à Courfaivre n'ont pas non plus donné de résultats concluants. Ici, les mesures du géoradar ont fourni de meilleurs résultats. Sur la fig. 75, les amplitudes des réflexions de la paroi arrière sont représentées. L'hypothèse ici est que les zones à forte humidité peuvent conduire à une plus forte atténuation du signal.

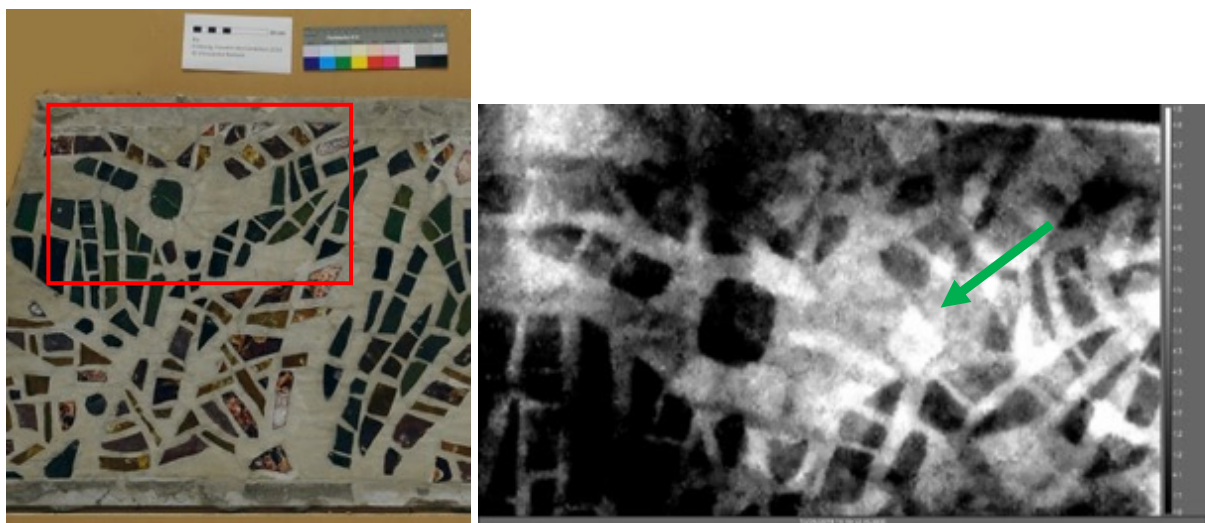


Fig. 74 : Image thermographique sur le panneau 3c après 40 minutes de refroidissement.

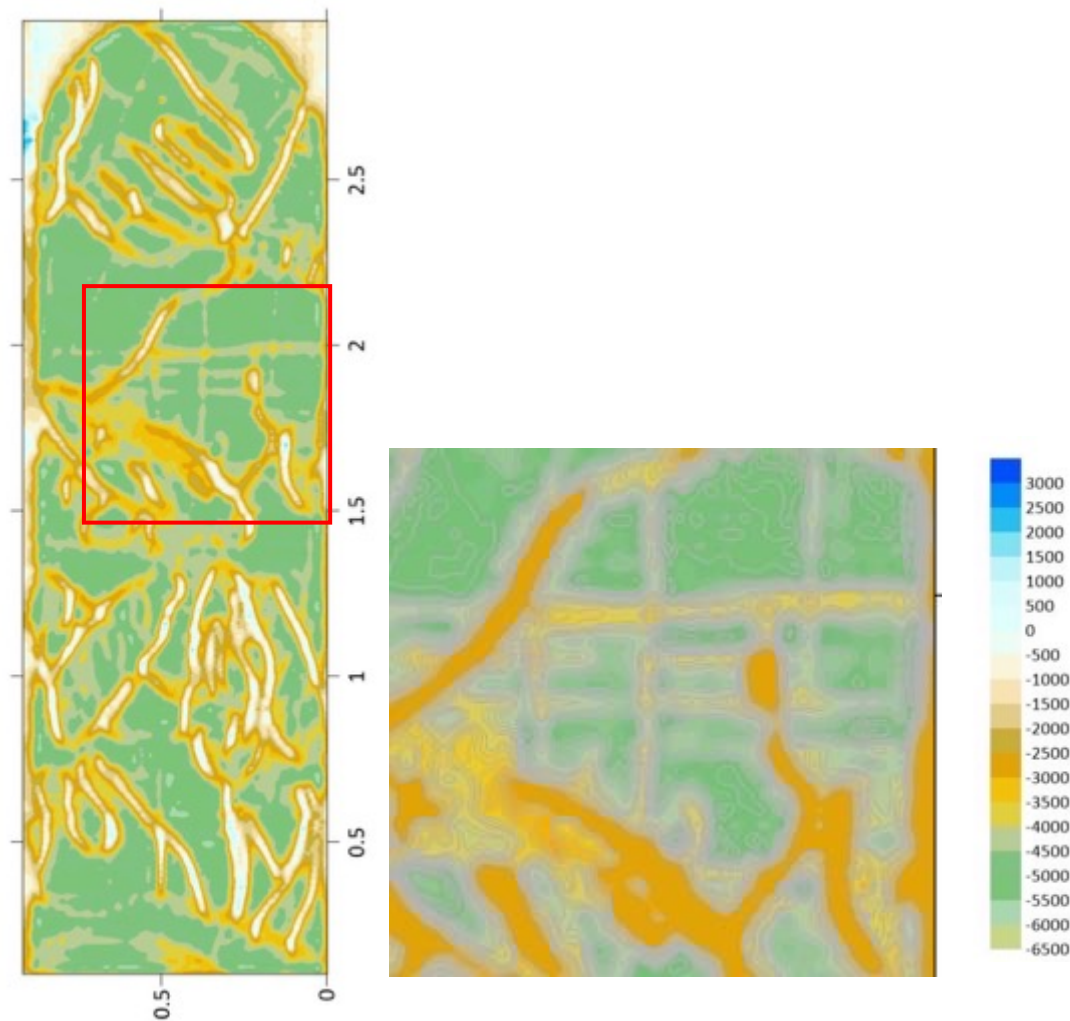


Fig. 75 : Géoradar. Amplitudes des réflexions de la paroi mesurées dans la Multiplication des pains; à droite détail de l'image à gauche.

Outre la thermographie et le géoradar, des mesures de résistivité et du potentiel électrochimique ont été testés. 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 (voir chapitre 5.2.3, fig. 70), 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 de résultats utiles.

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 cette approche sur d'autres vitraux en dalle de verre.

5.3 Résultats des analyses micro-invasives²⁰

5.3.1 Composition et propriétés du mortier

Trois petits fragments de mortier ont été analysés par microscopie électronique à balayage (voir tableau dans chapitre 4.4.1). Dans le cas du premier échantillon, il s'agit d'un fragment du mortier de pose du vitrail de Cingria à Fribourg (fig. 76, CF-M1). Le mortier est constitué d'une pâte de ciment à faible charge minérale (sable). Ce mortier a été formulé comme un coulis introduit pour remplir les vides et enrober la serrure métallique pour la protéger et caler les panneaux lors de la pose. Pour ces applications, il est courant d'utiliser du ciment rapide, de type Vicat prompt, mais les résultats d'analyse ont montré qu'il s'agit, dans le cas présent, de ciment Portland.

Le deuxième fragment de mortier provient de la face externe de la dalle de verre de Cingria (fig. 76, CF-M2). La texture de ce mortier fin de couleur grise est uniforme et sans porosité apparente. Une charge minérale (sable silico-calcaire) est visible à l'œil nu sous forme de grains blancs roulés de taille inférieure à 0.5 mm. L'analyse du mortier révèle l'utilisation d'un ciment de type Portland avec un degré d'hydratation moyen (avec grande réserve de grains non hydratés).

La microstructure des deux mortiers est dense et la porosité est principalement de type capillaire. Aucune bulle d'air occlus n'est observée, traduisant ainsi une mise en œuvre optimale à l'état frais. Aucune dégradation d'origine chimique et endogène (RAG, réaction sulfatique) n'a été identifiée. Les mortiers présentent un très bon état de conservation. Toutefois, il est à noter que la porosité capillaire ainsi que le degré de carbonatation du lé CF-M2 sont plus élevés que ceux du mortier de pose (CF-M1), qui ne montre aucun signe de carbonatation.



Fig. 76 : Fragments du mortier de pose CF-M1 (à gauche) et du mortier fin sur la face externe du vitrail de Cingria CF-M2 (à droite).

Le troisième fragment a pu être détaché du panneau *la Multiplication des pains* à Courfaivre (LC). Il est gris foncé et a une texture variable et une porosité apparente très faible. Une charge minérale

²⁰ Les résultats des analyses résumés ici sont présentés dans le rapport de Christophe Gosselin joint en annexe.

(sable silico-calcaire) est visible à l'œil nu sous forme de grains blancs roulés de taille d'environ 1-2 mm, principalement observée sur la face externe du mortier (fig. 77).

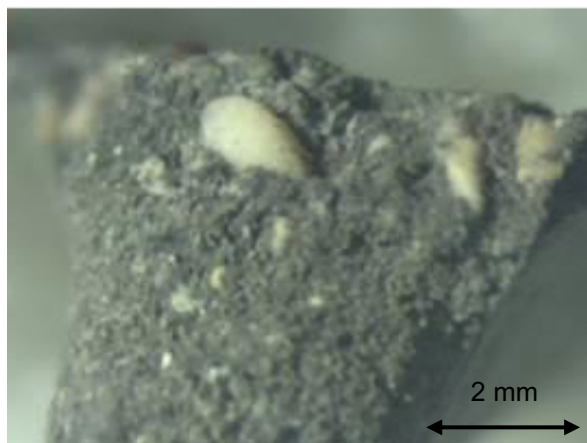


Fig. 77 : Fragment de mortier provenant de « la Multiplication des Pains » (LC) montrant des grains de sable roulés.

Comme dans les cas précédents, le liant du mortier est un ciment de type Portland avec un degré d'hydratation moyen. La microstructure du mortier est caractérisée par une faible compacité liée à une porosité capillaire très élevée. Les grains de sable sont très peu enrobés et la matrice présente de nombreuses fissures dues à un excès d'eau lors de la confection du mortier – certainement intentionnel pour obtenir un mortier fluide et assurer une mise en place du mortier dans les grands moules. La forte porosité capillaire du mortier a favorisé la diffusion de l'humidité et du CO₂ (et du SO₃ atmosphérique, en moindre mesure) et donc une carbonatation des phases hydratées et une sulfatation externe du mortier. La carbonatation du mortier est plus avancée, par rapport au lé de surface de la dalle de verre de Cingria (CF-M2). La présence d'un sable plus grossier réduit également la densité du mortier, qui est moins compact que le mortier du vitrail de Cingria.

5.3.2 Composition et altération du verre

Les deux fragments de verre analysés proviennent des pièces de verre de couleur orange fortement altérées (fig. 78). Certains de ces verres sont fragmentés à tel point que de petites écailles de verre se détachent facilement de la surface.

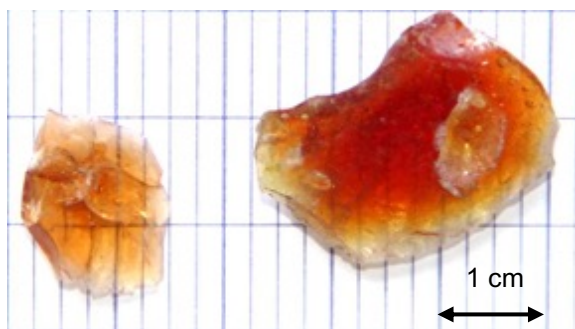


Fig. 78 : Fragments de verre orange analysés (échantillons no. CF-V1 et CF-V2).

Comme mentionné au chapitre 4.4.1, l'analyse par MEB avec sonde EDS ne permet pas de déterminer la composition exacte du verre. Il était tout de même possible d'identifier un verre de type calco-sodique avec faibles concentrations de potassium, soufre et phosphore (voir rapport de Christophe Gosselin, p. 12-13). Les verres du type calco-sodique sont normalement relativement stables et résistants aux processus d'altération causés par l'humidité stagnante. Pour l'instant, nous ne pouvons donc qu'émettre des hypothèses sur les causes de l'instabilité du verre orange. Il est possible que la coloration du verre, notamment l'ajout de soufre, réduise la stabilité du verre. Dans ce contexte, il est intéressant de constater que les verres de couleur bleue et verte – sans soufre ? – ne présentent que des dommages mineurs. Pour approfondir la question, il faudrait déterminer les compositions exactes des différents verres. Malheureusement, cela n'a pas été possible dans le cadre du projet.

Les deux fragments ont à la fois des surfaces « saines » et altérées. Les parties non altérées représentent des surfaces de cassures plus ou moins fraîches. Les zones altérées constituent les surfaces originales exposées aux intempéries et/ou à l'eau de condensation. Elles montrent les phénomènes typiques d'altération de verres peu stables (fig. 79) : une couche de gel (verre lessivé et hydraté) fissurée en surface, la présence des piqûres et cratères (« corrosion » du verre) et des sels tels que le carbonate de sodium (Na_2CO_3) et le carbonate de calcium (CaCO_3) précipités en surface.

Les altérations sont le résultat des processus de lessivage et d'hydratation et de dissociation lente du verre en contact prolongé avec de l'eau fût-ce l'eau de condensation ou de pluie.

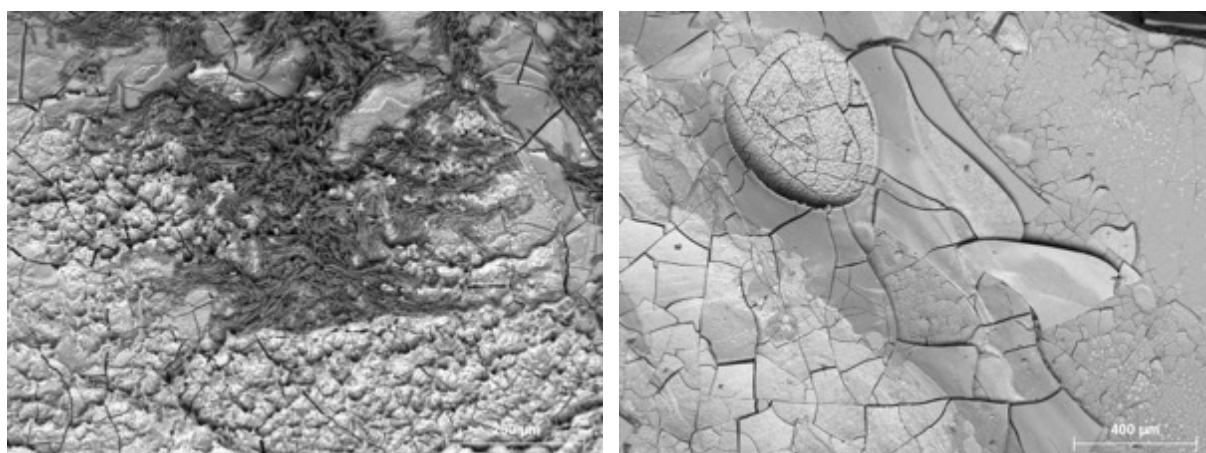


Fig. 79 : Images de la surface du verre orange altéré présentant couche de gel fissurée, cratères et sels précipités en surface (MEB, imagerie en électrons secondaires).

6 Réflexions sur l'état de conservation des dalles de verre examinées

6.1 Vitrail en dalle de verre d'Alexandre Cingria au Couvent des Cordeliers à Fribourg

6.1.1 Description

Si l'on ne tient pas compte des dommages sur les bords des panneaux, liés à la dépose du vitrail, l'œuvre est relativement bien conservée. Les dégâts identifiés par examen visuel sont décrits au chapitre 5.1.1. Les résultats des analyses non invasives et micro-invasives semblent confirmer cette hypothèse.

Le béton analysé présente une réserve de grains anhydres élevée, même quand une forte quantité d'eau a été ajoutée. Ces observations suggèrent un fort dosage initial en ciment pour la formulation du mortier. Ce dosage a sûrement été enrichi afin de pouvoir augmenter la quantité d'eau ajoutée et obtenir un mortier plus fluide, propice à l'enrobage optimal des pièces de verre. Les grains de ciment résiduels sont disponibles pour une hydratation ultérieure des phases les plus réactives (aluminat de calcium C_3A , silicate de calcium C_3S).

Les dégâts observés autour des verres altérés sont le résultat de réaction entre un verre de composition peu stable et apparemment peu résistant au contact avec l'eau. Le milieu alcalin (mortier) a probablement accéléré la décomposition du verre.



Fig. 80a : Relevé détaillé des dommages sur le panneau 3a, face externe.

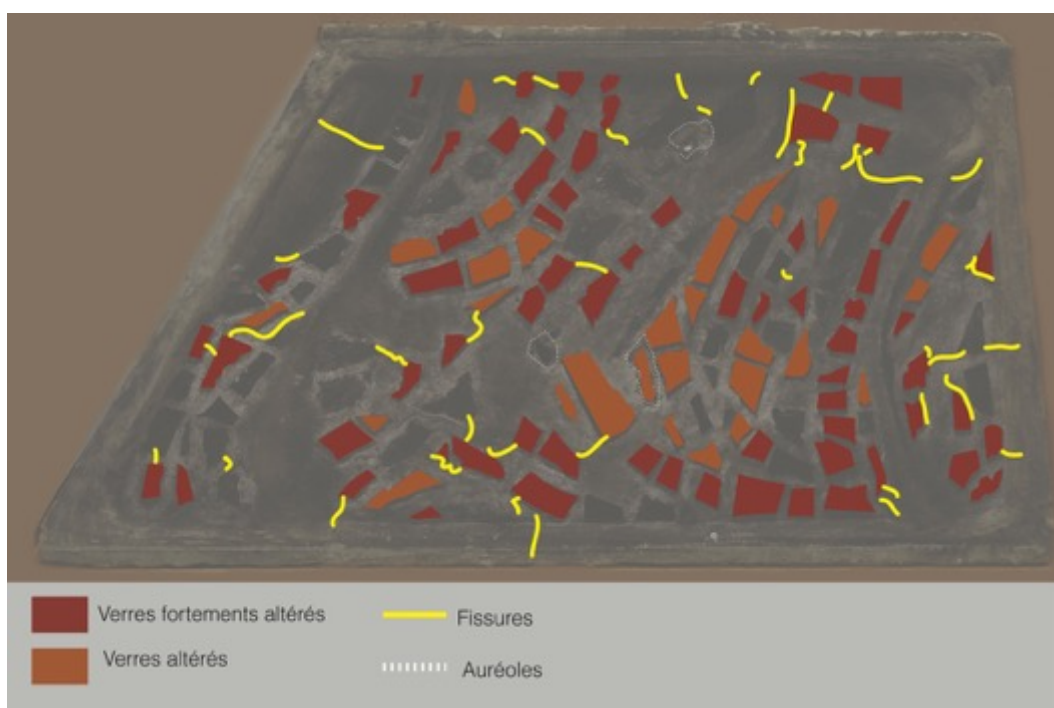


Fig. 80b : Relevé détaillé des dommages sur le panneau 3a, face interne.

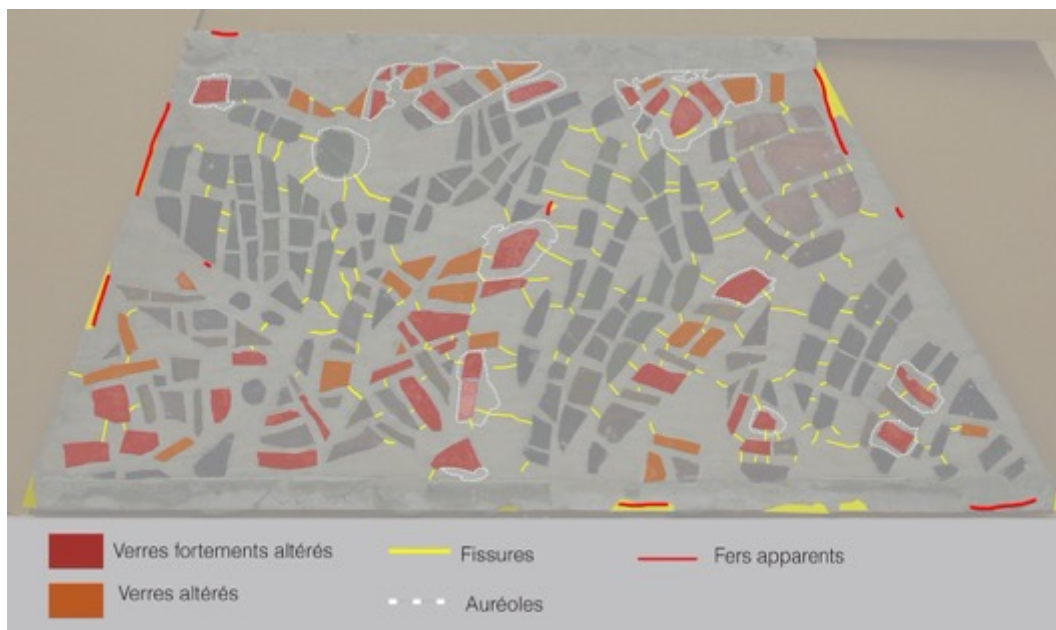


Fig. 81a : Relevé détaillé des dommages sur le panneau 3c, face externe.

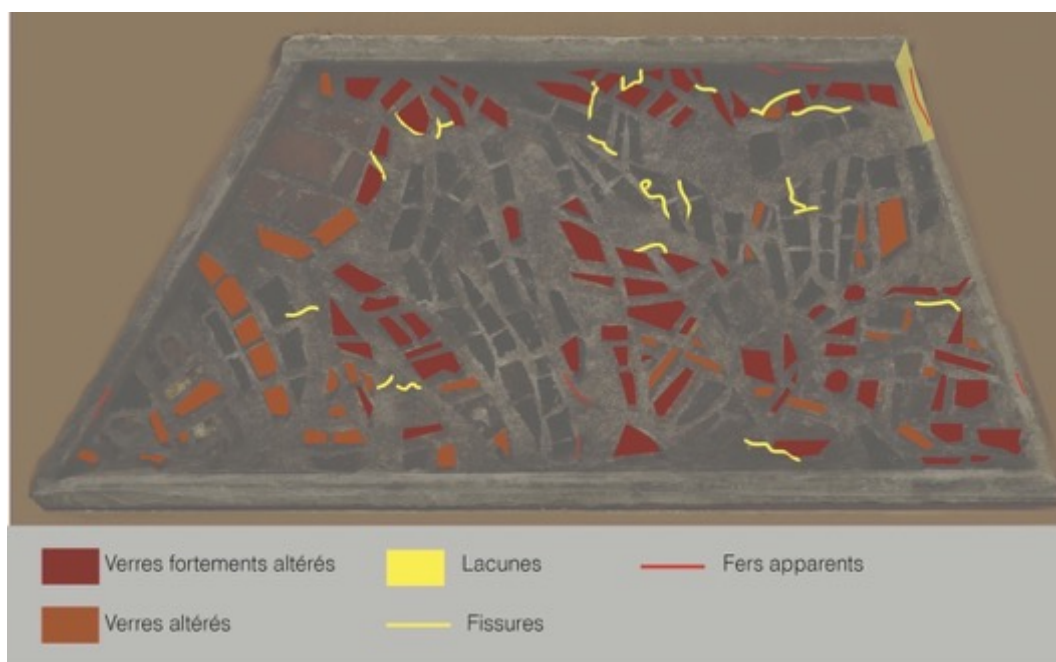


Fig. 81b : Relevé détaillé des dommages sur le panneau 3c, face interne.



Les dégâts semblent être plus prononcés sur la face externe (fig. 80 et 81). Il y a une relation claire entre le degré de dégradation observée et l'exposition : les panneaux les plus exposés aux intempéries, quand le vitrail était encore en place sont les plus altérés. Ils se trouvent sous les remplages et au bord inférieur du vitrail (fig. 82).

L'ensemble des dommages a probablement été accéléré par le stockage provisoire des panneaux dans un climat humide. Depuis leur transfert aux archives du couvent, les conditions plus favorables à la préservation des panneaux semblent avoir ralenti les processus de détérioration, notamment l'altération des verres et les dégâts engendrés par la formation de sels (causant fissuration et écaillage du béton, corrosion des fers exposés). Avec les conditions actuelles (50% d'humidité relative, 20°C), l'état de conservation des panneaux est jugé assez stable. Une conservation à long terme est garantie, à condition que les champs continuent d'être entreposés verticalement et à une distance d'environ 2-3 cm les uns des autres (pour une ventilation arrière).

Fig. 82 : Constat de l'état de conservation du vitrail d'Alexandre Cingria.

6.1.2 Recommandations

- Maintien des conditions climatiques et du stockage vertical des panneaux.
- Contrôle régulier de l'état de conservation, notamment monitoring
 - de la dégradation des verres
 - de l'efflorescence des sels en surface
 - de l'écaillage du béton dans les zones affectées par les sels
 - du degré de corrosion des fers exposés.

La documentation photographique – mis à disposition aux Archives du Couvent des Cordeliers sous forme numérique – représente la base pour ce monitoring en permettant la comparaison des examens ultérieurs avec l'état actuel.

6.2 Cycle de vitraux de Fernand Léger à l'église St-Germain d'Auxerre à Courfaivre

6.2.1 Description

L'état des fenêtres de l'église de Courfaivre a été étudié lors d'une première intervention menée par l'Expert Center pour la conservation du patrimoine bâti à Lausanne et le Vitrocentre Romont en 1999. Cette première étude a porté sur l'analyse des dommages visibles ainsi que la mesure de la perméabilité et de l'absorption d'eau du béton (à l'aide de Pipettes de Karsten) de trois médaillons sur la façade sud de l'église. Dans leur rapport final, les auteurs du rapport ont jugé critique l'état des dalles de verre étudiées et ont recommandé un projet de suivi comprenant une analyse plus complète et des investigations supplémentaires²¹. Ce n'est que dans le cadre du présent projet de recherche que les dalles de verres ont pu être réexaminées. Même si cette seconde campagne a principalement porté sur le développement de méthodes non invasives, les résultats de l'étude permettent toutefois de se prononcer sur l'état de conservation des dalles de verre. La comparaison du constat d'état de l'Annonciation de 2020 avec celui réalisé en 1999 a même permis de proposer une évolution des altérations²².

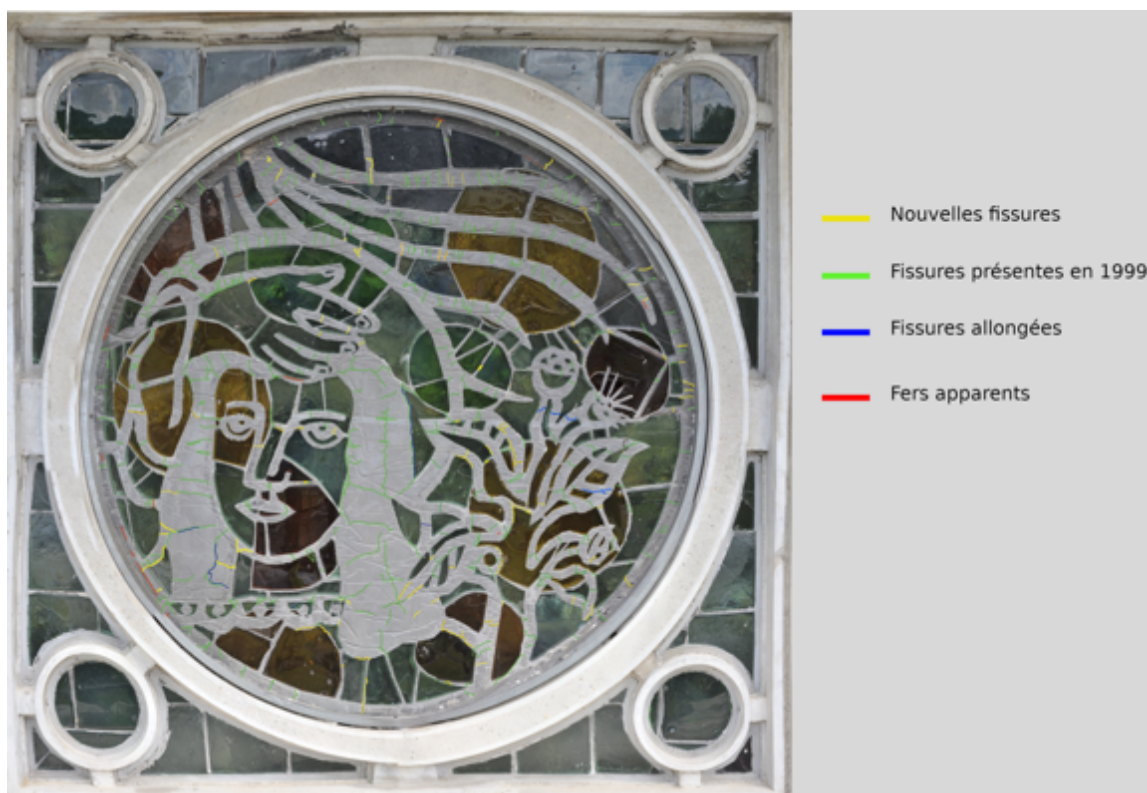


Fig. 83 : Relevé des dommages sur le médaillon de l'Annonciation.

Les dégradations ont légèrement évolué depuis ce premier constat (fig. 83) : certaines fissures se sont allongées et probablement agrandies (largeur et longueur). Elles sont principalement localisées dans les cheveux de la Vierge (à gauche) et dans les fleurs sur sa droite. Quelques nouvelles fissures sont apparues. Celles-ci sont notées en bleu et jaune sur l'image. Les barres d'armature exposées

²¹ Voir rapport de Mühlhaus Ebersole et Trümpler 1999, pp. 8-9.

²² Néanmoins, il faut prendre en compte que la comparaison des dégradations s'appuie uniquement sur les relevés réalisés en 1999, peu de photos ayant été prises à cette période. Des différences d'interprétation entre les deux constats peuvent donc induire des erreurs.

étaient déjà présentes dès le début. Cette dernière hypothèse est soutenue par le fait qu'il n'y a pas d'écaillage. Le béton est dans un bon état de conservation ; comme à Fribourg, le mortier présente une réserve de grains anhydres élevée due au fort dosage initial en ciment. Ces grains de ciment résiduels sont disponibles pour une hydratation ultérieure des phases les plus réactives.



Fig. 84 : Relevé des dommages sur la *Multiplication des pains*.

évolution mettent en danger la préservation des verrières. Les détériorations, notamment la corrosion progressive des armatures, le développement des fissures ainsi que la fragilisation des joints d'étanchéité, sont à observer sur le long terme afin de minimiser leur impact sur la conservation des dalles de verre. Actuellement, la restauration des ouvrants défectueux est beaucoup plus urgente.

La carbonatation des hydrates et la sulfatation, observées dans le mortier de la *Multiplication des pains*, ne sont pas préjudiciables pour la durabilité de la matrice cimentaire (fig. 84). Il est rare d'avoir des fronts de carbonatation au-delà de 2 cm et la grande partie des fers d'armature sont recouverts de plus de 2 cm de mortier. Le risque d'une corrosion des fers est donc réduit. Une corrosion locale des armatures demeure néanmoins possible pour les plus faibles épaisseurs de recouvrement, comme cela a été étudié en parallèle dans le cadre de cette étude, par mesure non destructive.

Les dégâts semblent être plus prononcés sur le côté sud ; il est probable que les variations de température plus importantes jouent un rôle, notamment dans le développement des fissures. Cette affirmation doit toutefois être prise avec réserve, car les médaillons de la façade nord n'ont pas pu être examinés de près.

L'état général ne s'est toutefois pas gravement détérioré. La progression des dommages est lente, sans détérioration drastique du béton. Il est toutefois difficile d'évaluer dans quelle mesure ces dommages ou leur

6.2.2 *Recommandations*

Les vitraux en dalle de verre sont bien conservés et encore non menacés. Dans l'ensemble, leur état ne demande qu'un contrôle régulier et quelques interventions ciblées et restreintes. Il s'agirait essentiellement de restaurations limitées, en particulier le colmatage des grandes fissures et des zones de pertes dans le béton avec un mortier adapté. L'amélioration de l'étanchéité des verrières serait également nécessaire, par le remplacement du mastic en silicone et la réparation des joints latéraux en mortier. Les ouvrants plus endommagés nécessitent un peu plus d'attention : la réfection des panneaux brisés, le colmatage des joints en mortier et la remise en fonction des dispositifs d'ouverture défectueux.

Les travaux devront être confiés à une entreprise expérimentée dans la restauration des biens culturels, notamment dans le domaine de la conservation de dalles de verre (voir membres de l'Association professionnelle suisse du vitrail APSV : www.vitrail-suisse.ch).

Toute intervention devra être documentée selon les directives du Corpus Vitrearum/ICOMOS pour la conservation et la restauration des vitraux (<http://www.corpusvitrearum.org/>).

En outre ces interventions, nous recommandons d'établir un dossier de suivi avec cahier des charges qui spécifiera le contrôle périodique des vitraux (tous les 3-5 ans environ) et les travaux de maintenance pour assurer le bon état de conservation des dalles de verre à long terme. La documentation susmentionnée fera partie de ce dossier.

Comme dans le cas du vitrail de Cingria à Fribourg, le contrôle régulier comprendra le suivi (monitoring) des dégâts observés : fissures, corrosion des fers apparents, écaillage du béton. Le rapport présent ainsi que la documentation photographique, archivée au Vitrocentre Romont et remise à la Paroisse et au Service des biens culturels du canton du Jura sous forme numérique, servira de base pour ce monitoring en permettant la comparaison de l'état actuel avec les examens ultérieurs.

De par leur fonction de fenêtre et barrière climatique, les dalles de verre sont exposées aux intempéries et aux dommages mécaniques ainsi qu'à l'eau de condensation, qui se forme sur les surfaces internes des vitraux chaque fois que la température de surface descend en dessous du point de rosée. Même si nous n'avons pas constaté de dommages liés aux conditions climatiques à l'intérieur et à l'extérieur, ni sur les vitraux ni sur les surfaces environnantes, nous recommandons d'envisager des mesures préventives :

- Contrôle du climat intérieur et – si nécessaire – adaptation du concept climatique afin de minimiser le risque de condensation sur les surfaces internes des dalles de verre et des murs environnants des fenêtres.
- Établissement d'un concept de ventilation assurant une aération modérée et contrôlée de l'intérieur de l'église. À notre avis, les ouvrants existants sont à préserver. Ils doivent être réparés en améliorant les mécanismes d'ouverture afin de réduire le risque d'endommagement des panneaux.

7 Réflexions et perspectives

Les deux campagnes d'investigation menées dans le cadre du projet ont permis d'acquérir des informations sur les coûts et les avantages des méthodes non invasives utilisées pour étudier des vitraux en dalle de verre. La combinaison de ces 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 *in situ* et en laboratoire à l'aide de tout petits échantillons. Toutefois, certaines techniques comme le géoradar sont chronophages et coûteuses. De plus, l'interprétation des données reste complexe et demande des compétences particulières.

L'étude a également montré que la méthodologie reste à perfectionner sur de nombreux aspects, que certains problèmes restent non résolus et des questions sont encore sans réponse. En particulier, la caractérisation des propriétés du béton par des méthodes non invasives s'est avérée difficile, même si plusieurs méthodes se sont révélées prometteuses. Il est également évident que les techniques et les résultats doivent encore être validés grâce à l'étude d'autres dalles de verre afin de pouvoir faire des recommandations plus fiables.

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 analysant d'autres objets, possiblement plus détériorés, et de répondre aux questions ouvertes, telles que la raison pour laquelle les verres jaunes et oranges sont plus sensibles que les bleus et les causes des efflorescences autour des verres altérés.

Nous prévoyons de publier les résultats du projet dans des périodiques scientifiques et revues spécialisées (voir bibliographie). Une partie des recherches sera également publiée sur la banque de données de recherche vitrosearch.ch et ainsi accessible à un public plus large.

8 Remerciements

Pour leur coopération et support du projet, nous remercions le Couvent des Cordeliers à Fribourg et le Conseil de paroisse de la Commune ecclésiastique de Courfaivre. Nous tenons à remercier tout particulièrement Mme Petra Zimmer (Archives et Bibliothèque du Couvent des Cordeliers) et Monsieur Hubert Girardin (Conseil de la paroisse de Courfaivre) pour leur disponibilité et soutien lors des travaux sur place. Nous remercions Sarah Amsler et Valentine Costa pour leur support dans la préparation et publication des données sur vitrosearch.ch.

Le projet a été soutenu financièrement par l'Office Fédéral de la Culture – Section Culture du bâti, la Fondation Sophie et Karl Binding et la Fondation UBS pour la culture.

9 Bibliographie

- Albert Esteve, A., Bonet de Ahumada, J. et Montolío Torán, D. (2014). Restauración de la vidriera de hormigón del Seminario Diocesano Mater Dei en Castellón: Retos de ayer y hoy. Intervention au XXXVII^e Curset jornades internacionals sobre la intervenció en el patrimoni arquitectònic. « Patrimoni sacre: permanent innovació ». Barcelona : AADIPA, COAC, 1-1i. Repéré à <http://hdl.handle.net/2099/16332>.
- Barrat, R. (réalisateur). (1964, 11 avril). *À vous de choisir votre avenir* [RTS archives]. Repéré à : <http://www.rts.ch/archives/tv/jeunesse/a-vous-de-choisir-votre-avenir/7519078-cimenteur-verrier.html>.
- Bertolini, L., Carsana, M., Gastaldi, M., Lollini, F. et Redaelli, E. (2011). Corrosion assessment and restoration strategies of reinforced concrete buildings of the cultural heritage. *Materials and Corrosion*, 62(2), 146-154. DOI: 10.1002/maco.201005773.
- Bonnefoit, R., Kaiser, A., Noverraz, C., Sauterel, V. & Schiffhauer, A. (2018). *Vitraux contemporains de l'arc jurassien* (Guides d'art et d'histoire de la Suisse), Berne : Société d'histoire de l'art en Suisse SHAS.
- Bouvier, J. (1944). Alexandre Cingria. Peintre, mosaïste et verrier. Genève.
- Brevet d'invention no. 68289 de Richard A. Nüscheler publié 1 mars 1915, « Steinfenster mit Abschluß aus Buntgläsern ». Espacenet Patentsuche, CH68289(A) - 1915-03-01.
- Brevet d'invention no. 756.065 d'Auguste J. A. Labouret publié le 4 décembre 1933, « Windows, particularly stained glass windows for churches and other buildings of reinforced concrete, and a process for their production ». Espacenet Patentsuche, FR756065(A) - 1933-12-04.
- Breyse, D. (éd.) (2012). Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR, Dordrecht, Heidelberg, London, New York. DOI 10.1007/978-94-007-2736-6
- Bueche, J. (1957). Die Kirche von Courfaivre und ihre Bildfenster. *Cementbulletin*, 25(24), 1-10. doi.org/10.5169/seals-153354 (dernier accès 10 mars 2021)
- Bujard, J. (2007). Le couvent des Cordeliers de Fribourg: 750 ans d'architecture franciscaine. *Cahiers d'Archéologie Fribourgeoise*, 9, 118-153.
- Busse, F., Heidrich, C., Kleine, M., Sander, C., et Ünal M. (2015). BEGLARES II Protection and restoration of monumental concrete-glazing with cathodic protection systems. *9th Forum for the conservation and technology of historic stained-glass*, 8-10 juillet 2015, Paris.
- Cuzange, L., Loisel, C., Marie-Victoire, E, et Faure, W. (2010). Conserver les dalles de verre : un nouveau défi interdisciplinaire pour le vingt et unième siècle. Dans Shepard M. B., Lisa Piloni L. et Strobl, S. (dir.), *The art of collaboration stained-glass conservation in the twenty-first century* (Actes du symposium au Metropolitan museum of art, New York, 1-3 June 2009), 176-182.
- Dariz, P. (2014). Künstliche Steine. *Restauro*, 120(3), 40-45.
- De Vis, K. (2014). *The consolidation of architectural glass and dalle de verre; assessment of selected adhesives*. Thèse de doctorat, Universiteit Antwerpen : Faculteit Ontwerpwetenschappen, Antwerpen, Belgique.
- De Vis, K., Caen, J., Janssens, K, et Jacobs, P. (2013). The consolidation of cracks and fissures in dalle de verre; assessment of selected adhesives. Dans H. Roemich et K. Van Lookeren Campagne (dir.), *Recent Advances in glass, stained glass and ceramics conservation*. Amsterdam, 43-52.
- Diesbach, F. de (1937, 2 janvier). La restauration de l'église des Cordeliers. *Le Curieux*.
- Girard, G. (1913). *Couvent des Cordeliers*. Haarlem.

- Gosselin, C. et Pintér, F. (2016), Examples of early age Portland cement applied in historical masonries, in: Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference, Santorini, Greece, 10–12 October 2016, 211–219.
- Gosselin, C, Wolf, S., et Hugenschmidt, J. (en préparation), Cingria and Gaudin artwork, a 1936 dalle de verre under the microscope. *Journal of Microscopy - special issue from 18th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials (EMABM)*, 15-18 may 2022.
- Histoire du Couvent des Cordeliers (2015). Consulté le 18 janvier 2021 de <https://www.cordeliers.ch>.
- Hugenschmidt J. et Balayssac J.P. (2012), Ground Penetrating Radar, in Breysse D. (dir.), *Non-destructive assessment of concrete structures: reliability and limits of single and combined techniques*, Springer, 63-71.
- Hugenschmidt, J., Wolf, S. et Gosselin, C. (en préparation), Non-destructive testing of the Fernand Léger Dalles de Verre Glazings in Courfaivre, Switzerland, *Journal of Cultural Heritage*.
- Kuske, M. et Brunner, M. (1989). Rénovation de vitraux d'église avec verre enchâssé dans du béton, *Bulletin du ciment*, 57(24), 1-10.
- Loire, N. (1989). Les vitraux en dalle de verre en France, des origines à 1940. *Histoire de l'art. Décors muraux*, 8, 39-48.
- Loire, N. (1993). *Le vitrail en dalle de verre en France, des origines à 1940*. Thèse de doctorat, Université de Paris I.
- Luneau, J.-F. (2002). *Félix Gaudin (1852-1930), peintre-verrier et mosaïste*. Thèse de doctorat, Université de Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand, France.
- Maierhofer C., Reinhardt H. W. et Dobmann G. (dir.) (2010), *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures* (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Vol. 2), <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-950-5.50027-0>.
- Marie-Victoire, É. (1996). *Les altérations visibles du béton : définitions et aide au diagnostic*, Champs-sur-Marne : Cercle des partenaires du patrimoine.
- Marie-Victoire, É. et Texier, A. (2003), Alterations in old concretes, in: Grementieri, F., Liernur, J. F.; Schmidt, C., *Architectural Culture around 1900: Critical Reappraisal and Heritage Preservation*, Buenos Aires, 247–53.
- Meer S. (2002). *La dalle de verre en Suisse. Émergence d'une nouvelle technique de vitrail dès 1935*. Mémoire de licence, Université de Lausanne.
- Mühlhaus Ebersole, S. et Trümpler, S. (1999), *Analyse de situation et proposition du projet vitraux dalles de verre, église St-Germain d'Auxerre, Commune de Courfaivre, JU, rapport non publié no. EC/SE/99-01.01*.
- Noverraz, C., Sauterel, V. et Wolf, S. (2021). De béton et de verre : la dalle de verre et ses premières utilisations en Suisse. *Monuments Vaudois*, 11 (à paraître).
- Paroisse catholique de Courfaivre (2005). *Saint-Germain d'Auxerre*. Porrentruy.
- Pepi, R.M., Buchner, L.N. et Gembinski, C. (2012). Conservation of Dalle de Verre at the New York Hall of Science, *APT Bulletin : Journal of Preservation Technology*, 45(4), 3-12.
- Pörtner, R. (2000). Behutsame Betonsanierung von Baudenkmälern. Dans *Betoninstandsetzung 2000*, Actes du symposium international, Innsbruck-Igels und Berlin, Innsbruck, 53–59.
- Pörtner, R.(1997). Patch repair leaves architectural integrity. The Beethoven hall of Stuttgart Liederhalle. *DOCOMOMO International, The Fair Face of Concrete*, Eindhoven, 120–126.

- Rayman, O., Bujard, J., Schmid, A., Weck, J.-B., Huber, T. et Merlin, F. (1991). Renaissance de l'église des Cordeliers. *Pro Fribourg*, 90-91.
- Rosenhauer, M., Corminboeuf, P., Marquard, P., Rück, S., Cosatti, V. & Zimmer, P. (2012). *Convent des Cordeliers Fribourg*. Fribourg.
- Rudaz, P. (1997). Église des Cordeliers : pas de résurrection en vue pour la Pentecôte. *Pro Fribourg*, 116, 10-15.
- Sans auteur (1918). Die Steinfenster mit Buntverglasung von Richard A. Nüscheler. *Schweizerische Bauzeitung*, 71/72(10), 89.
- Sauterel, V. (2018). Les vitraux contemporains du Jura. *NIKE Bulletin*, 6(12), 21-25.
- Schmid, A. A. (1993). Die Restaurierung der Franziskanerkirche in Freiburg i. Ue. Dans M. Kubelik & M. Schwarz, M. (dir.), *Von der Bauforschung zur Denkmalpflege, Festschrift für Alois Machatschek zum 65. Geburtstag* (pp. 245–259). Vienne.
- Strub, M. (1959). Les monuments religieux de la ville de Fribourg. Dans M. Strub (dir.), *Monuments d'art et d'histoire du canton de Fribourg, la ville de Fribourg* (tome III, pp. 3-96). Bâle.
- Válek, J., Hughes, J. et Groot, C. (dir.) (2012), *Historic Mortars: Characterisation, Assessment and Repair* (RILEM Book Series 7).
- Wolf, S. et Trümpler, S. (2019). Les Steinfenster ou « fenêtres de pierre » de Richard A. Nüescheler. Dans A. Jeandrevin (dir.), *Un rêve d'architecte. La brique de verre Falconnier* (pp. 178-179). Berne.
- Wolf, S., Hugenschmidt, J., Gosselin, C. et Dumont, A. (en préparation), Towards a holistic approach to the conservation of dalle de verre glazing. Présentation orale et article dans *Actes (preprints) du XXX^e Symposium du Corpus Vitrearum International et du XI^e Forum pour la conservation et la technologie du vitrail*, Barcelone 4-10 juillet 2022.
- Ünal, M. et Kühne H.-C. (2011). Dalles de verre - damage mechanisms, maintenance techniques and mortars for restoration. *EWCHP-2011 - European workshop on cultural heritage preservation*, Berlin, 26-28 septembre 2011.
- Ünal, M. et Kühne H.-C., Kleine, M. et Sander, C. (2011). Development and design of repair and protection principles and a concrete repair mortar for the conservation of slab glass set in concrete from the 20th century. Dans *GLASSAC 11 - 3rd GLASSAC Conference 'Glass science in art and conservation'*, Wertheim, 10-12 mai 2011, 43-46.

10 Annexes

- Rapport de Johannes Hugenschmidt, Fachhochschule OST, Rapperswil
- Rapport de Christophe Gosselin, Geotest SA, Mont-sur-Lausanne