



METZ (57) - Eglise Notre-Dame - Baie 106  
Saint Grégoire VII, saint Thomas de Cantorbery, panneau 13

## 1 - INTRODUCTION

Le pôle scientifique « Vitrail », longtemps en situation difficile liée au manque de personnel, a obtenu un poste d'ingénieur de recherche, depuis le 1<sup>er</sup> mars 2007. Cette affectation permet, d'une part de répondre plus rapidement aux demandes des architectes en chef des monuments historiques et des restaurateurs et, d'autre part, d'entreprendre de nouvelles collaborations scientifiques et ceci sur du long terme.

Il devient également possible aux ingénieurs du pôle scientifique « Vitrail » d'intervenir dans le cadre d'écoles thématiques ou d'enseignements divers pour contribuer à la dissémination des connaissances.

## 2 - RECHERCHES

### *Sous contrats ou subventions*

#### ■ Étude de procédés de collage de pâtes et dalles de verre (suite)

*William FAURE (RESCOLL - Ecole de chimie de Bordeaux)*

*Élisabeth MARIE-VICTOIRE - Claudine LOISEL - Jean-Jacques BURCK (LRMH)*

Cf : pôle scientifique « Béton », page 17.

#### ■ Étude de traitements de restauration de vitraux en dalle de verre, contaminés par les sels (suite)

*Laurence CUZANGE (Atelier DEBITUS)*

*Élisabeth MARIE-VICTOIRE - Claudine LOISEL - Jean-Jacques BURCK (LRMH)*

Cf : pôle scientifique « Béton », page 17.

■ **Étude de vitraux médiévaux de la région Île-de-France**

Babou MAGASSOUBA (doctorant, université de Marne-la-Vallée - 77) - Sarala DJANARTHANY (maître de conférence, Laboratoire des géomatériaux, CNRS FRE 2455, université de Marne-la-Vallée - 77) - François FARGES (Musée national d'histoire naturelle)  
Claudine LOISEL - Jean-Jacques BURCK (LRMH)

Un travail de thèse, sur l'étude de l'impact de l'environnement sur la corrosion des vitraux de grands édifices franciliens, a commencé en 2005 et se poursuivra jusqu'en 2008. Cette thèse est financée par la région Ile-de-France en partenariat avec l'Université de Marne-la-Vallée.

L'objectif de ce doctorat est, dans un premier temps, de mener une étude scientifique préliminaire sur les altérations observées sur des vitraux médiévaux d'Ile-de-France (Sainte-Chapelle à Paris et cathédrale de Saint-Denis). L'état sanitaire des panneaux de Saint-Denis a été réalisé en collaboration avec le restaurateur en charge du chantier (Isabelle Baudoin). L'étude fine des processus physico-chimiques à l'origine de la formation des sels sur la surface de ces verres est une recherche fondamentale menée dans le but de mieux adapter les techniques de restauration qui seront mises en œuvre. D'autre part, des campagnes de mesures ont été réalisées à Sain-Denis pour obtenir des informations sur les conditions environnementales *in situ* et permettre ainsi de mieux comprendre les facteurs à l'origine de la dégradation des peintures. L'étude comparative entre des panneaux anciens déposés au début du XIX<sup>e</sup> s. (conservés dans le dépôt de vitraux du LRMH) et les panneaux déposés en 1997 permettra d'évaluer, en particulier, l'impact de l'ère industrielle et contemporaine sur les verres.



Cathédrale de Saint-Denis (93) - Vitrail du signe du Tau

■ **Vitrail et environnement atmosphérique : simulation et modélisation de l'altération des verres médiévaux**  
**Programme national de recherche sur la connaissance et la conservation des matériaux du patrimoine culturel**

Caroline BOULICAUT (stage MASTER-MAPE - Université Paris 12) - Tiziana LOMBARDO (Maître de Conférences, université Paris 12) - Anne CHABAS (maître de conférences, université Paris 12)  
Claudine LOISEL - Jean-Jacques BURCK (LRMH)  
Durée 2 ans : 2006-2008

Les verres peu durables, en particulier ceux à composition silico-calco-potassique, ont été utilisés de façon prédominante dans la réalisation des vitraux du Moyen-Âge. Du fait de leur faible durabilité chimique, ces verres se trouvent souvent dans un mauvais état de conservation. Des nombreuses recherches ont été mises en place dans les dernières décennies afin de décrire, comprendre et modéliser les processus d'altération de la matrice vitreuse de ces vitraux. Néanmoins certaines questions restent sans réponse, notamment pour ce qui concerne le rôle spécifique des paramètres intrinsèques (composition du verre) et extrinsèque (environnement atmosphérique) dans les processus de dégradation (lixiviation, corrosion, encroûtement, soiling). C'est dans une optique d'approfondissement de ces processus que le projet de recherche « Vitrail et environnement atmosphérique : simulation et modélisation de l'altération de verres médiévaux » a été mis en place.

Cette recherche se base sur une exposition en site réel de verres modèles de composition similaire à ceux du Moyen-Âge et du suivi continu de certains paramètres météorologiques (humidité relative, température, hauteur des précipitations) et environnementaux (concentration en polluants gazeux et particulaires, et pH des précipitations) qui sont susceptibles de jouer un rôle dans les processus d'altération atmosphérique des verres des vitraux.

Au cours de la première année, le travail a consisté à mettre en place l'exposition sur site (tour nord de l'église Saint-Eustache à Paris) avec l'installation des échantillons à l'abri et à la pluie ainsi que la mise en place des appareillages pour le suivi atmosphérique (pH des précipitations, température, humidité). Les échantillons sont prélevés mensuellement. L'objectif des analyses est d'identifier les principales formes de dégradation développées *in situ* et de déterminer les cinétiques des processus qui en sont responsables.

Une autre partie importante porte sur l'étude des verres de vitraux anciens. Deux sites ont été sélectionnés, la cathédrale d'Évreux et l'église Saint-Ouen de Rouen. Des échantillons de verres du XIV<sup>e</sup> siècle ont pu être utilisés pour le projet. Les observations et analyses de surface et de coupes permettent de quantifier l'altération de ces verres et de corréler ces résultats à ceux des verres modèles, dans le but de décrire les cinétiques d'altération pour des durées très longues.

L'étude des verres du XIV<sup>e</sup> a montré que pour des compositions et un temps d'exposition similaire, le type d'environnement influait peu sur le mécanisme et le degré d'altération. Les faces externes des verres, en contact avec l'atmosphère, présentent des traces de lixiviation témoignée par la formation à leur surface d'une couche perturbée appauvrie en cations et enrichie relativement en silicium. L'épaisseur de cette couche est très similaire pour ces deux sites ( $69 \pm 29\text{m}$  pour ROUEN et  $88 \pm 32\text{m}$  pour Évreux). Ce résultat intégré à ceux qui seront obtenus sur les verres modèles après la fin de l'exposition pourra, à terme, permettre de déterminer les cinétiques d'altération des verres en milieu atmosphérique.

Les résultats obtenus pour les verres modèles, après 4 mois d'exposition, montrent que les verres présentent tous des évidences d'un processus de lixiviation. De plus, les néocrystallisations formées par l'interaction entre les cations extraits du verre et les gaz atmosphériques représentent environ 80 % des particules recouvrant la surface des échantillons. Ceci montre que le verre joue un rôle déterminant dans les processus d'altération. Néanmoins, le degré d'hydratation des échantillons, ainsi que les variations de masse et les observations au MEB, montrent que les échantillons en contact direct avec les précipitations s'altèrent davantage. Ceci indique donc que l'environnement joue également un rôle ; la part respective des deux reste à déterminer en utilisant les résultats des durées d'exposition plus longues. Une solution pourrait venir d'une approche statistique multivariable de type fonction dose-réponse, où les paramètres environnementaux (doses) seront corrélés à la réponse du verre (épaisseur de la couche perturbée par exemple).

Le rôle des facteurs intrinsèques (composition du verre) va être appréhendé par la comparaison des altérations développées par les verres modèles (trois types de verre) ayant des compositions très différentes.

#### **Programme de recherche européen « CONSTGLASS »**

##### **« Matériaux de conservation pour les vitraux – évaluation de la durabilité, de la réversibilité et de la reprise des traitements et performance des produits et stratégies de restauration »**

*Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung, Bronnbach (Allemagne) - Dombauverwaltung der Hohen Domkirche Köln Cologne (Allemagne) - Faculty of Art Conservation, Academy of Fine Arts, Krakow (Pologne) The Cathedral Studios, Canterbury (Grande-Bretagne) - Centre suisse de recherche et d'information sur le vitrail, Romont (Suisse) - Hogeschool Antwerpen, Conservation Studies (Dept. B), Antwerpen (Belgique) - Fyne Conservation Services, St. Catherine's Argyll (Grande-Bretagne) - University of Gent, Gent (Belgique) - Sincrotrone Trieste S. C. p. A., Trieste (Italie) - LBW-Bio Consult (Allemagne)*

*Claudine LOISEL (CPP-LRMH)*

*Durée 3 ans : 2007-2010*



Ce projet se propose d'évaluer la durabilité de matériaux très divers, tels que les résines époxy, les acrylates, les polyuréthanes qui ont été utilisés pour la conservation-restauration des vitraux depuis 1950. L'objectif est également d'optimiser et d'appliquer des méthodes analytiques avancées non destructives et des outils en biologie moléculaire afin de comprendre les effets à long terme des traitements de conservation, ainsi que de la biodétérioration des matériaux appliqués sur le verre. Ce projet permettra également d'étudier le degré de réversibilité de ces matériaux. Enfin, dans le but de proposer des stratégies pour remédier à la reprise des traitements, des essais avec de nouveaux matériaux seront également réalisés pour améliorer la conservation-restauration des vitraux.

Les cas d'études ont été choisis dans cinq pays européens présentant des histoires de restauration différentes et incluant tous des vitraux médiévaux ainsi que des objets des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Les sites français choisis par le LRMH sont les vitraux des cathédrales de Chartres, Bourges et Le Mans, traités dans les années 1970 avec une résine polyuréthane, le Viacryl, soit en protection, soit en refixage de grisaille.

Le projet a débuté officiellement le 1<sup>er</sup> juin 2007 et ceci pour une durée de 3 ans.

Le LRMH procédera à un état sanitaire complet des panneaux déposés et des tests de réversibilité et de retraitabilité, avec l'aide d'une restauratrice diplômée.

Quelques exemples de dossiers traités sont développés ci-dessous.

▣ **METZ (57). Église Notre-Dame, chœur, baie 101 et 106, nef, baie 114, vitraux XIX<sup>e</sup> s**  
**Étude sanitaire, documentation et analyses physico-chimiques (rapport n° 1192 A)**

*Claudine LOISEL - Jean-Jacques BURCK (LRMH)*

Cette étude, concernant les vitraux de l'église Notre-Dame de Metz, a été demandée au LRMH par l'architecte en chef des monuments historiques, dans le cadre de l'étude préalable à la restauration des élévations extérieures latérales (nef et chœur).

Les problèmes d'altération des vitraux de Notre-Dame concernent principalement les peintures, les verres étant dans un bon état général. Ces résultats reflètent bien les problèmes posés par les vitraux au XIX<sup>e</sup> s. où l'on savait fabriquer des verres de composition stable, verre sodique, avec par contre des grisailles de mauvaise tenue, problème venant soit des proportions fondant/oxyde dans la composition soit du traitement thermique adopté. On note dans le cas présent une inhomogénéité dans la grisaille provenant du mélange fondant/oxyde réalisé et surtout de la granulométrie des différents composants. Le traitement thermique peut quant à lui avoir eu un impact sur la porosité de la grisaille, cette porosité entraînant par la suite une grande fragilité de la peinture. En effet les pores vont favoriser l'effet capillaire et permettre une stagnation d'eau dans la matière. Le processus d'altération peut alors s'accélérer, l'eau étant le premier paramètre indispensable pour enclencher le phénomène d'altération. Il s'ensuit des pertes d'adhérence au niveau de l'interface verre/grisaille conduisant au décollement et à la perte de matière. C'est dans ce cas extrême qu'il sera nécessaire de procéder à une consolidation des grisailles.

Par ailleurs, les vitraux de l'église Notre-Dame de Metz, de par leur datation, constituent un bel exemple de l'évolution des techniques d'un atelier des années 1840, très artisanal, à un atelier quasi industriel des années 1860-1880. Il s'agit de vitraux présentant une richesse technologique indéniable. L'utilisation abondante de la gravure, du jaune d'argent en faces interne et externe, les verres mousselines, les grisailles en externe réalisées au pochoir, la qualité du travail du peintre par superposition de couches de peinture ont été mis en évidence au cours de l'étude.



*Metz (57), église Notre-Dame - Baie 106 - Panneau 16, saint Grégoire VII, saint Thomas de Cantorbery*

▣ **NEW-YORK (Etats-Unis). Église presbytérienne, la Nativité, vitraux de Tiffany (1893). Analyses physico-chimiques de la couche noire sur la face externe et du vernis appliqué sur les peintures en face interne (rapport n° 1199 A)**

*Claudine LOISEL (LRMH)*

Dans le cadre d'un programme franco-américain, financé en partie par la « Florence Gould Fondation », le Brooklyn Stained Glass Conservation Center (BSGCC), dirigé par David Fraser, a demandé conseil au LRMH sur deux problèmes majeurs posés par les baies de l'église presbytérienne Lafayette à Brooklyn, à New York (USA). Les analyses de cette étude ont été effectuées au LRMH. Un déplacement de 3 mois à New York a permis de réaliser les observations sur place et de finaliser ce rapport.

L'étude a permis de répondre aux deux principales questions posées par David Fraser :

- la nature de la couche noire présente sur un seul coté de l'édifice, façade ouest, a pu être identifiée comme étant un dépôt très riche en fer et en soufre provenant des fumées de l'incendie qui s'était produit dans la rue South Oxford avant la mise en place des verrières de protection. Le nettoyage conseillé consiste à utiliser des compresses d'EDTA, appliquées pendant deux heures sur les zones à traiter et renouvelées jusqu'à l'élimination totale de la couche noire, suivi d'un rinçage à l'eau ;
- le vernis appliqué en face interne après 1947 est en réalité une résine époxy. Les essais de nettoyage ont montré la possibilité de l'éliminer par bain et compresses renouvelées d'acétone. Ce travail délicat devra s'effectuer sous loupe binoculaire dans un endroit suffisamment bien aéré pour éviter une intoxication par solvant du restaurateur. La difficulté sera de bien éliminer la résine sans toucher à la grisaille sous-jacente. En ce qui concerne les retouches grossières qui avaient été appliquées en 1947, David Fraser a pris la décision d'en éliminer certaines. Deux types de retouches ont été identifiées par l'analyse. Les peintures sombres seront conservées alors que les peintures claires, très épaisses, seront supprimées. Pour redonner une lisibilité aux carnations, le dessin sera repris et complété sur la face externe de la pièce de verre.



New-York - Église La Fayette - Détail du vitrail de la Nativité

#### ▣ CHARTRES (28). Cathédrale Notre-Dame - Vitraux du haut-chœur, XIII<sup>e</sup> s. - Étude préalable à la restauration de la baie 107

*Claudine LOISEL - Jean-Jacques BURCK (LRMH)*

Dans le cadre de l'étude préalable à la restauration de la baie 107 de la cathédrale de Chartres, Isabelle Baudoin-Louw, restauratrice diplômée, a sollicité le LRMH. La première question concernait la difficulté de nettoyage des dépôts blancs, observés en face interne sur de nombreuses pièces de verre. L'autre point important portait sur les fissurations des verres de Burgstahl. René Billa, alias Richard Burgsthal (1884-1944) fut un important maître-verrier du début du XX<sup>e</sup> siècle. Burgsthal s'est beaucoup intéressé à la problématique de la coloration dans la masse de certains vitraux médiévaux et à leurs procédés de fabrication.

##### *Nettoyage des dépôts blancs*

De nombreuses pièces de verre présentaient un dépôt blanc dont la nature était visuellement difficile à identifier. La question était de savoir s'il s'agissait d'un dépôt exogène, d'un lavis ou d'une altération du verre.

Pour en connaître la nature et ainsi adapter le traitement, il a donc été nécessaire d'effectuer plusieurs types d'analyse. Les observations et analyses ont été réalisées à l'aide du microscope électronique à balayage MEB (*JEOL JSM 5600 LV*) associé à l'analyse qualitative par spectrométrie de rayons X, avec un détecteur à dispersion d'énergie EDS (*Oxford 6587*). Cette méthode de microscopie permet également de voir la morphologie du dépôt. Des analyses en spectroscopie infrarouge et en fluorescence X ont également été effectuées pour compléter l'étude.

L'échantillon représentatif, sélectionné pour les analyses, est un verre vert provenant du panneau 5 de la baie 107. Les photos ci-dessous montrent l'aspect du dépôt blanc en lumières transmise et réfléchie.

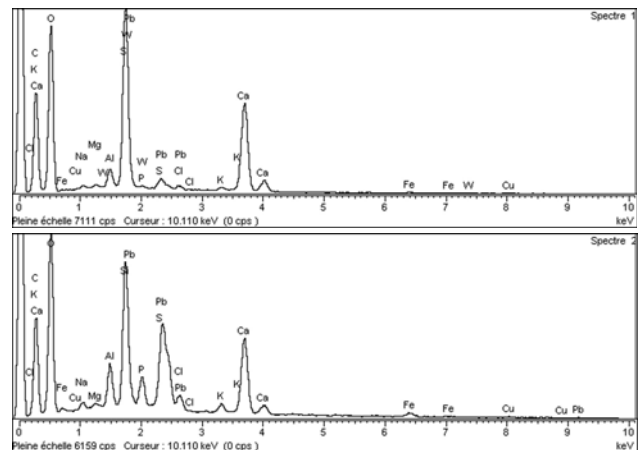
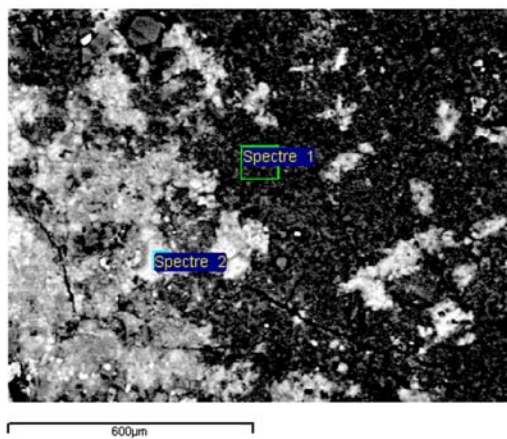


*Vue en lumière transmise*



*Vue en lumière réfléchie*

Les zones de dépôt blanc ont été analysées, à l'aide de différentes techniques : la fluorescence X, la microscopie électronique à balayage associée à l'analyse qualitative EDS et la spectroscopie infrarouge.



*Observation au MEB (Site I1z3) et analyses EDS des zones 1 et 2*

Les résultats au MEB/EDS révèlent la présence d'éléments majoritaires comme la silice Si, le calcium Ca et minoritaires tels que le plomb Pb, le potassium K, le fer Fe, et le cuivre Cu. Des éléments traces comme l'aluminium Al, le sodium Na, et le magnésium Mg sont également constitutifs de ce dépôt blanc.

L'ensemble des résultats révèle que cette couche blanche est en réalité une grisaille avec beaucoup de silice (fondant), c'est à dire un lavis. La présence de carbone et de calcium révèle des restes de carbonate de calcium provenant du masticage. Ces analyses ne montrent pas de sulfate de calcium comme produit d'altération.

L'analyse du voile blanc avec l'aide du MEB/EDS, de la spectroscopie infrarouge et de la fluorescence X conduit à la conclusion que ce voile blanc est une phase très riche en silicate avec en éléments mineurs (Pb, Ca, K, Fe, Cu). On a donc affaire à une grisaille très diluée sur un verre vert riche en fer et en cuivre. La présence de calcium et de carbonate atteste qu'il existe également des restes de carbonate de calcium provenant du masticage.

#### *Verres de Burgstahl*

Les verres de Burgstahl présentait des fissurations dans la masse pouvant conduire à des écailles et avec le temps à des pertes de matière. Ce problème est lié à des tensions dans le verre, phénomène résultant d'un traitement thermique inadapté avec en particulier une baisse en température trop rapide lors du refroidissement. Face à ce type d'altération, pouvant conduire dans des cas extrêmes à une dégradation importante des pièces de verres, un moyen de consolidation s'avère indispensable.

Le LRMH mène actuellement un programme de recherche sur la consolidation des verres fissurés des dalles de verre pouvant permettre de résoudre également le problème des verres de Burgstahl, l'idée étant de les consolider avec une colle la mieux adaptée possible et surtout de trouver un moyen d'injection efficace (voir pôle « Béton », page 20).

## ▣ AUDINCOURT (25), Église du Sacré-Coeur - Diagnostic des dalles de verre du baptistère

*Claudine LOISEL - Jean-Jacques BURCK - Élisabeth MARIE-VICTOIRE (LRMH)*

Les dalles de verre qui constituent les parois du baptistère de l'église du Sacré-Coeur d'Audincourt, sont dues au peintre Jean Bazaine et ont été réalisées par le maître-verrier Jean Barillet en 1951. Leur mauvais état de conservation a justifié la dépose de la porte pour l'établissement d'un diagnostic et définition d'un traitement : les armatures du béton, faiblement enrobées, se corrodent sous l'effet de la carbonatation, et certaines pièces de verre sont profondément fissurées. L'origine de l'altération de ces verres n'est pas encore complètement élucidée (tensions dues à la fabrication du verre, contraintes thermiques et/ou mécaniques).

Il est important de préciser que la restauration des verrières en dalle de verre n'en est qu'à ses balbutiements. Ainsi, si pour le béton des techniques expérimentales de réparation étaient déjà à l'étude en 2003, le cas du traitement de la fissuration de dalles de verre restait à explorer. Aussi, concernant le traitement des pièces de verre, depuis 2004, des travaux de recherche sont en cours, en collaboration avec la société RESCOLL sur le collage « sans dépose » de pièces de verre.

Cependant, l'ensemble de ces essais ayant été réalisé sur des verres à vitre « classiques », incolores, actuellement une nouvelle série d'analyses est programmée sur des pièces de verre plus représentatives des verrières d'Audincourt (verres plus épais et colorés). Une dernière étape sera consacrée aux techniques d'injection (du type de celles utilisées pour la réparation de pare-brise), ne nécessitant pas la dépose des pièces de verre.

Enfin concernant le traitement des épaufrures du mortier des verrières, une réparation « traditionnelle » devra être envisagée. Ce type d'opération nécessite une purge du mortier non adhérent, un décapage des armatures sur toute leur circonférence, et l'application d'un mortier de réparation à base de liant hydraulique.

Par contre, vu l'épaisseur des verrières et les profondeurs de carbonatation mesurées, il est probable que de nouvelles épaufrures apparaîtront peu à peu, au gré des épisodes de pluie. Aussi, deux options ont-elles été proposées :

- soit, sous réserve d'un dosage plus précis des chlorures, un traitement du mortier par pulvérisation d'un inhibiteur de corrosion minéral, sachant, d'une part, que des précautions devront être prises afin d'éviter tout contact entre l'inhibiteur et les pièces de verres et, d'autre part, que ce type de produit conserve encore à ce jour un caractère expérimental ;
- soit un traitement de la cause de la formation des épaufrures, c'est-à-dire une gestion de l'humidité dans le mortier, incluant un drainage autour de l'église afin de limiter les remontées capillaires, associé à une protection par double verrière.



*Audincourt - Église du Sacré-Coeur - Baptistère en dalle de verre*

