

Incidence bactérienne dans les phénomènes de brunissement des vitraux anciens

Geneviève Oriol, Thomas Warscheid, Faisal Bousta et Claudine Loisel

Résumé Au cours des dernières décennies, la corrosion des vitraux a fait l'objet de nombreuses études. Le brunissement des verres est une des formes d'altération rencontrées. Les investigations chimiques ont principalement attribué ce phénomène à l'oxydation des ions manganèse entrant dans la composition du matériau. De récentes investigations microbiologiques ont révélé que des bactéries pouvaient être impliquées de manière significative dans la biodétérioration des verres anciens. La première étape de cette étude a eu pour objectif de prouver l'existence d'une intervention bactérienne dans l'oxydation du manganèse. La seconde partie a été consacrée à la simulation puis à la caractérisation du processus sur des verres modèles. Cette recherche a permis une meilleure compréhension du phénomène de brunissement, ce qui représente une avancée dans la connaissance des problèmes d'altération des vitraux anciens et pourra aider à la mise en place de nouveaux outils de conservation.

Mots-clés Vitraux, brunissement, manganèse, oxydation, bactéries.

Abstract **Microbial impact in the browning of old stained glass windows**
During the last decades, corrosion of stained glass windows was widely studied. The browning of glass corresponds to one of the encountered deterioration types. The chemical investigations mainly attributed this phenomenon to the oxidation of manganese, element of the glass composition. Recent microbiological studies revealed that bacteria could be implied significantly in the biodeterioration of ancient glass. The first stage of this study aimed to prove the existence of a bacterial intervention in the oxidation of manganese. The second part was devoted to simulation and characterization of the process on model glass samples. This research allowed a better understanding of the browning phenomenon. These results represent an advance in the knowledge of deterioration problems of old stained glass windows and could lead in the future to develop new conservation tools.

Keywords Stained glass windows, browning, manganese, oxidation, bacteria.

Le phénomène de brunissement des vitraux

Au cours des dernières décennies, la corrosion des vitraux anciens a fait l'objet de nombreuses études. Les dommages, principalement dus à l'eau et à la pollution de l'air, se manifestent sous la forme soit de croûtes uniformes riches en produits d'altération, soit de cratères de corrosion. Ces dégradations sont essentiellement dues à la lixiviation qui est un phénomène d'échange ionique dans le verre résultant de l'action des agents atmosphériques. Le brunissement correspond à l'une des figures d'altération couramment rencontrées. Il est décrit comme une couche superficielle dense qui réduit significativement la transparence du vitrail [1-2]. Les investigations chimiques ont principalement attribué ce phénomène à l'oxydation des ions manganèse, avec passage d'un état Mn^{2+} à Mn^{3+} et/ou Mn^{4+} , dans la couche superficielle du matériau, accompagné d'une diminution de la concentration de ces mêmes ions dans la matrice [3]. Le brunissement est observé sur divers matériaux riches en manganèse et en fer, ce qui est le cas des verres du Moyen-Âge, fabriqués à base de potasse et dans lesquels le manganèse était inclus soit pour obtenir la décoloration de

certaines impuretés dues à la présence de fer, soit comme agent de coloration rose ou pourpre (figure 1).

Toutefois, l'origine du processus de brunissement n'est pas clairement identifiée : est-elle purement chimique ou bien y aurait-il une intervention microbienne ? En effet, de nombreuses observations sur site et verrières déposées semblent montrer une corrélation entre la présence d'un biofilm, plus ou moins dense, et le brunissement du verre.

Par ailleurs, des études sur la biodétérioration des vitraux ont permis de montrer l'importance de l'action des champignons sur l'altération du matériau, tant sur le plan chimique que mécanique, par la formation de fissures, craquelures ou dépôts minéraux comme les oxalates. On peut citer les genres *Alternaria*, *Epicoccum*, *Mucor*, *Penicillium* ou encore *Aspergillus* qui sont très souvent rencontrés sur les vitraux anciens. La grande capacité de ces moisissures à synthétiser et accumuler les mélanines brunes, de façon intra- et extracellulaire, autorise à penser que ces micro-organismes contribuent également à un autre type de brunissement des vitraux [4].

De récentes investigations microbiologiques ont révélé que des bactéries autotrophes ou hétérotrophes pouvaient être impliquées de manière significative dans la



Figure 1 - Vitrail du XV^e siècle, Église Les Noes-Pres-Troyes (Aube).

biodétérioration des verres anciens. Plus particulièrement, certaines d'entre elles comme les « ferrobactéries » possèdent un potentiel, grâce à leurs capacités métaboliques, pour oxyder les cations du fer et du manganèse par la voie enzymatique, entraînant ainsi le brunissement des matériaux minéraux [5-7].

La mise en évidence du rôle de l'activité bactérienne dans le processus de brunissement

La première étape de l'étude avait pour objectif de prouver l'existence d'une intervention bactérienne dans l'oxydation du manganèse, un des phénomènes responsables du brunissement. Des spécimens brunis ou non provenant de différents monuments historiques français, pièces en dépôt ou encore exposées sur site, ont été minutieusement sélectionnées pour servir de base à l'étude.

La seconde partie a été consacrée à la simulation puis à la caractérisation du processus d'origine bactérienne, avec des germes identifiés et sur des verres modèles, de composition chimique connue.

Les investigations analytiques

Les échantillons de vitraux anciens

Plusieurs fragments de vitraux conservés en dépôt au domaine national de Champs-sur-Marne ont été sélectionnés :

- Un morceau de verre de couleur vert clair, provenant de la cathédrale de Tours (37)

Cet échantillon de 3 cm sur 4 et de 0,2 mm d'épaisseur est orné de décors peints à la grisaille noire. Sur la surface exposée à l'origine à l'intérieur, il présente quelques dépôts gris et, sur la face extérieure, une couche de poussières et salissures peu adhérentes, sans corrosion particulière.

- Un morceau de couleur pourpre, de la cathédrale d'Évreux (27), de 0,5*2,5 cm

Si la partie à l'origine exposée à l'intérieur ne présente aucune dégradation, l'autre face est entièrement couverte d'un encroûtement dur et marron qui cache totalement la lisibilité.

- Un morceau de couleur vert clair, de l'église de Sainte-Opportune du Bosc (27), de 0,5*2 cm

Sur ce fragment, côté intérieur, il reste des vestiges de décors peints ainsi que quelques dépôts blancs. Côté extérieur, une croûte brune opacifie le verre.

- Un morceau de couleur vert foncé, de l'église de Sainte-Opportune du Bosc (27), de 1,5*4 cm

La surface intérieure ne présente aucun décor peint ; l'autre côté a une surface piquetée par un nombre important de cratères comblés par des dépôts marron à noir.

La composition chimique des éléments déposés, déjà établie lors d'études antérieures, montre que la majeure partie des spécimens est riche en manganèse et fer (tableau I).

Tableau I - Composition chimique des vitraux médiévaux sélectionnés.

% en poids	Tours	Évreux	Sainte-Opportune 1	Sainte-Opportune 2
SiO ₂	52,57	54,72	54,11	50,67
TiO ₂	0,13	non déterminé	non déterminé	non déterminé
Al ₂ O ₃	1,26	0,65	1,46	3,5
CaO	13,66	17,25	22,09	18,41
MgO	7,09	3,21	0,57	4,45
FeO	0,57	non déterminé	0,95	2,72
MnO	1,83	1,46	1,6	2,69
Na ₂ O	1,83	0,69	non déterminé	non déterminé
K ₂ O	16,33	15,32	17,5	16,6
P ₂ O ₅	4,63	5,9	0,29	1,4

Les analyses microbiologiques

Le premier objectif de cette recherche a concerné la connaissance de la communauté microbienne présente à la surface des vitraux. En préalable aux analyses microbiologiques, les pièces provenant du dépôt ont d'abord été placées en chambre humide sur un lit d'argile, pendant six semaines à la température ambiante, sans additif nutritif d'aucune sorte, afin de réactiver la flore microbienne présente mais en sommeil (figure 2).



Figure 2 - Aspect de la chambre de réactivation avec les morceaux de vitraux sur lit de vermiculite.

Chaque échantillon a alors fait l'objet d'un examen en microscopie optique afin de visualiser les biofilms de surface, directement puis par le biais de méthodes de coloration spécifiques.

L'observation sans préparation a montré des réseaux denses de mycéliums à pigment noir. La PAS (« periodic acid schiff »), coloration utilisée en histologie pour mettre en évidence les polysaccharides, a souligné la présence de films microbiologiques, démontrant que les cratères étaient largement remplis de dépôts microbiens et que la contamination pouvait pénétrer à l'intérieur même du matériau.

La détermination de l'hydrolyse de la fluorescéine di-acétate (FDA) est une autre méthode simple, sensible et fiable pour évaluer l'activité microbiologique d'un substrat. Plus l'action enzymatique, liée à la microflore totale, est forte, plus la FDA est hydrolysée, libérant de la fluorescéine jaune observable en microscopie. Dans ce cas, l'activité révélée n'est que légère, probablement due à une faiblesse du système enzymatique des cellules présentes, mais en corrélation évidente avec les points de corrosion.

La numération de la flore présente à la surface des spécimens de verres a suivi deux approches : ensemencement de milieux de culture soit par contact direct de l'échantillon sur la gélose (milieu de culture solide), soit avec une solution issue d'un rinçage minutieux de l'échantillon.

Plusieurs milieux de culture synthétiques ont ainsi été inoculés : *BR*, milieu Bunt et Rovira pour les bactéries oligotrophes ; *BF-Mn* (Bromfield-Manganese-Agar), milieu pour mettre en évidence les bactéries oxydant le manganèse (figure 3) ; et *BF-Fe* (Bromfield-Iron-Agar) pour mettre en évidence les bactéries oxydant le fer.

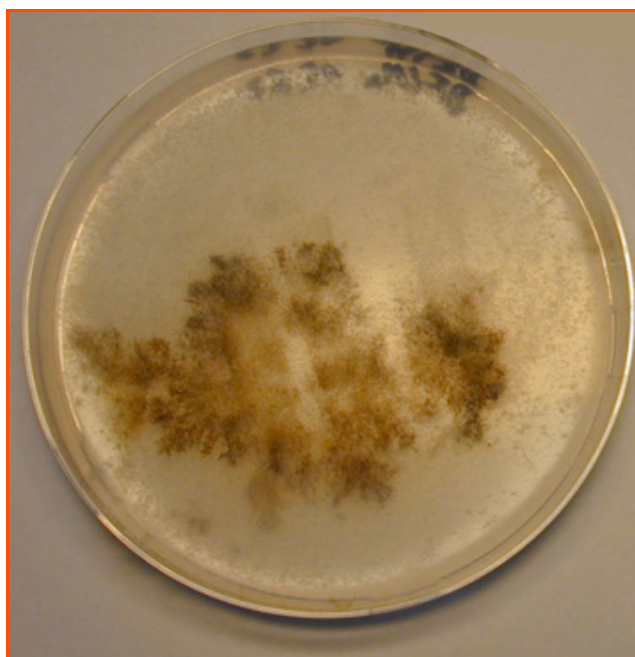


Figure 3 - Aspect de la culture sur milieu BF enrichi en manganèse, permettant de visualiser les dépôts noirâtres dus à l'oxydation bactérienne du manganèse.

Les cultures après contact direct ont plutôt stimulé le développement des champignons que celui des bactéries. Par contre, l'analyse des eaux de rinçage a été beaucoup plus probante et une grande quantité de germes bactériens a été réactivée. Le tableau II récapitule les données obtenues

Tableau II - Résultats des numérations exprimées en UFC (« unité formant colonie ») par gramme de matériau.

Nc = non comptable (les bactéries étant en trop grand nombre pour être quantifiées).

Spécimens de vitraux	Milieux de culture		
	B R	BF Mn	BF Fe
Tours	6 907	7 671	3 968
Évreaux	Nc	10 933	12 400
Sainte-Opportune 1	Nc	Nc	2 051
Sainte-Opportune 2	3 365	1 018	982

pour quelques échantillons, sans différenciation d'espèces, et montre que les germes cultivés sur milieux enrichis en manganèse ou en fer sont à des taux élevés.

L'identification des souches bactériennes a apporté un complément utile à la numération. Cette identification repose sur la comparaison de diverses morphologies des souches à étudier vis-à-vis de souches références. L'automatisation de ces méthodes d'identification, utilisant des galeries comme le système API (Appareillage et Procédé d'Identification), a l'avantage de standardiser les caractères biochimiques recherchés et par suite d'améliorer la reproductibilité des résultats. Cette gamme propose seize produits d'identification qui couvrent la quasi-totalité des groupes bactériens avec plus de 550 espèces différentes et permet d'avoir la meilleure réponse relative aux espèces concernées. C'est la galerie API 20 NE (NE : non entérobactéries) qui a été utilisée.

Onze souches potentiellement capables d'oxyder le manganèse ont ainsi pu être discriminées sur l'ensemble des colonies visibles. La classification a indiqué que dix d'entre elles appartiennent à l'espèce *Burkholderia cepacia* (ancien *Pseudomonas cepacia*) et la dernière a été identifiée comme *Chryseomonas luteola*. Ce sont des germes opportunistes courants, qui sont considérés comme très résistants aux métaux lourds, ce qui pourrait expliquer leur persistance sur les verres au regard du plomb qui forme le réseau des vitraux.

La simulation du processus de brunissement

L'étude a alors été poursuivie par la simulation du phénomène d'abord sur milieu de culture spécifique, de composition chimique identique à celle des vitraux anciens, puis sur des verres modèles, avec les bactéries isolées dans la première étape.

Simulation sur milieu de culture synthétique

La composition des milieux de culture « verre » a été définie sur la base des éléments chimiques trouvés dans les verres anciens, riches en manganèse, à laquelle a été ajouté de l'agar, classiquement utilisé pour les milieux gélosés.

Afin de compléter la simulation, une partie des milieux a été additionnée de produits organiques communément utilisés pour la restauration comme le détergent à pH neutre (savon doux), l'huile de lin, ou encore de polluants reconnus pour s'accumuler sur les vitraux exposés aux conditions atmosphériques comme les hydrocarbures. Ces composés ont été ajoutés pour vérifier leur éventuel impact sur le phénomène d'oxydation du manganèse (stimulation ou inhibition ?).

Les bactéries ont alors été inoculées sur ces différents milieux. Après six semaines d'incubation à 22 °C, la preuve

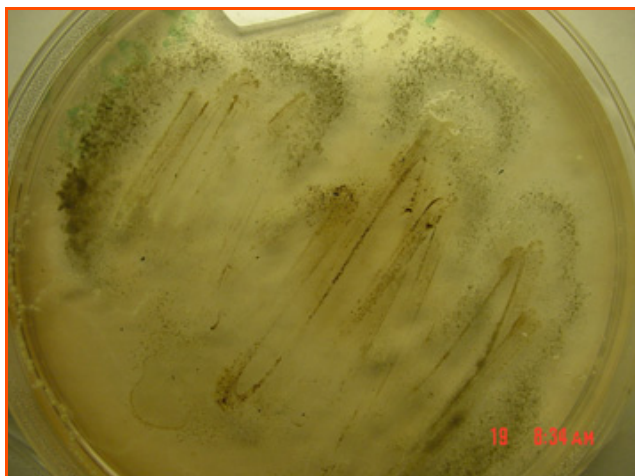


Figure 4 - Aspect des spots noirs d'oxyde de manganèse sur le milieu synthétique « verre ».

de la biooxydation du manganèse a été constatée sous la forme de spots noirs à la surface de la gélose (figure 4).

L'huile de lin et plus particulièrement le détergent à pH neutre semblent accentuer le processus de brunissement. Ainsi, un nettoyage humide des vitraux avec détergent à pH neutre pourrait accélérer ultérieurement le processus d'oxydation bactérienne du manganèse. Enfin, des apports environnementaux comme les dépôts d'hydrocarbures pourraient également influencer le processus mais sans accentuation notable du brunissement. Néanmoins, le processus exact de l'accélération de la biooxydation du manganèse en présence de détergent ou d'hydrocarbures reste à approfondir.

Simulation sur verres modèles

Après la preuve de la capacité des bactéries à oxyder le manganèse sur milieux synthétiques, il fallait recréer le processus directement sur des verres modèles. Ceux choisis dans le cadre de cette étude ont été fabriqués par le Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) à Würzburg en Allemagne. Ils ont été mis au point dans les années 80 pour permettre d'une part de simuler l'altération des verres médiévaux, et d'autre part pour être utilisés comme outils de contrôle de l'environnement sous le nom commercial Glassensor®. C'est le verre modèle nommé M6, riche en manganèse, qui a servi de support aux expériences (tableau III).

Tableau III - Composition du verre modèle M6 (en pourcentage massique).

SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃
48,0	3,0	25,5	14,0	3,0	1,5	4,0	1,0	-

Les échantillons M6 ont étéensemencés, sur quatre zones séparées, avec deux souches bactériennes de *Burkholderia cepacia* (nommées E57 et G14). Ces bactéries ont été inoculées soit sur le verre directement pour les zones référencées E57S et G14S, soit après application de détergent à pH neutre pour les zones E57A et G14A. Au bout de trois semaines d'incubation, le phénomène de brunissement apparaissait, symptomatique d'un début d'altération du verre. La réaction semblait plus nette sur les zones avec le détergent à pH neutre (figure 5).

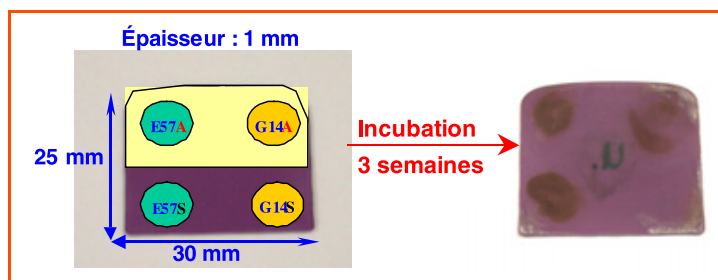


Figure 5 - Représentation de la simulation sur le verre modèle M6. E57 et G14 : deux souches bactériennes de *Burkholderia cepacia*, A : avec détergent, S : sans détergent.

Contrôle en microscopie électronique à balayage

Les échantillons ont alors été observés à l'aide d'un microscope électronique à balayage (JEOL JSM 5600 LV) dans le but de caractériser la morphologie de l'altération rencontrée. La microscopie électronique à balayage est une technique basée sur le principe des interactions électrons/matière. Un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, ré-émet certaines particules. Différents détecteurs permettent d'analyser ces particules et de reconstruire une image de la surface.

Une analyse qualitative a également été réalisée au moyen de la microanalyse X par dispersion d'énergie EDX (Oxford 6587) pour identifier la composition élémentaire au niveau des zonesensemencées.

Il est important de préciser que le verre avait été altéré au préalable par un vieillissement accéléré de six semaines en enceinte climatique (variations d'humidité et de température), pour permettre d'amorcer ensuite rapidement les interactions entre le verre modifié par lixiviation et les colonies bactériennes implantées.

Les observations et analyses ont été réalisées sur une zone brunie après culture bactérienne, d'une part directement sur la surface du verre et d'autre part sur des coupes transversales. Pour ces deux types d'échantillon, il n'a pas été nécessaire de métalliser la surface, les expérimentations étant réalisées sous vide partiel. Cette zone présente des fissurations sur toute la surface et des parties plus sombres localement (figure 6). La comparaison des résultats d'analyse permet de bien différencier ces zones plus sombres (spectre S2 de la figure 7), moins riches

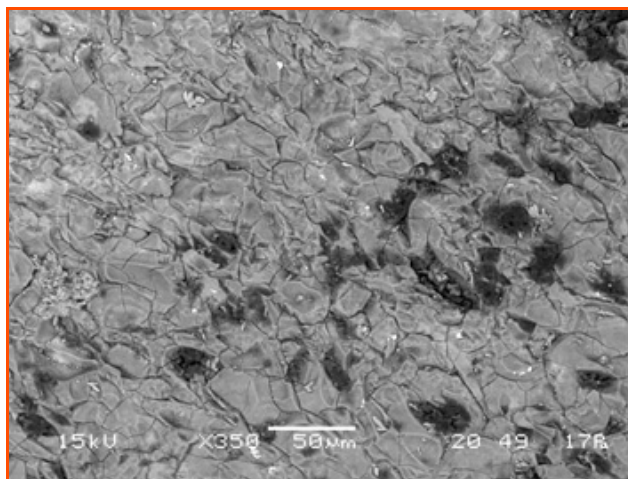


Figure 6 - Aspect de la surface brunie après culture bactérienne.

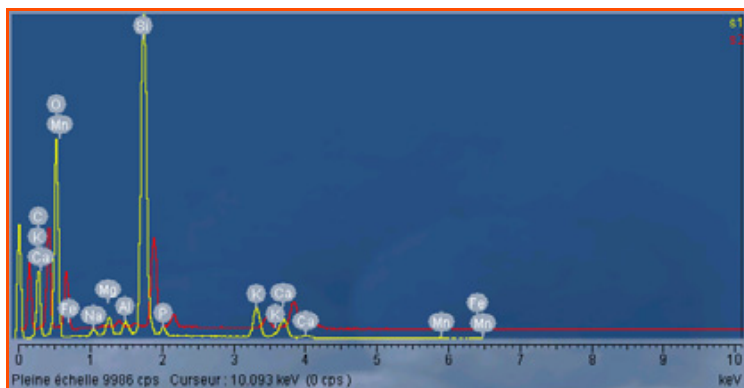


Figure 7 - Spectres S1 (en jaune) et S2 (en rouge) de l'analyse EDX.

en alcalins, alcalino-terreux, des zones plus claires (spectre S1 de la figure 7).

Les échantillons en coupe (figure 8) informent sur la couche perturbée du verre qui est plus ou moins homogène et dont l'épaisseur varie de 5 à 20 μm . En ce qui concerne l'impact réel des bactéries sur la couche perturbée, il est difficile de visualiser une quelconque modification en profondeur après trois semaines d'incubation, celle-ci restant en surface à ce stade d'altération. Il était donc important d'avoir recours à d'autres techniques analytiques comme la microscopie électronique en transmission (MET) pour compléter la caractérisation du phénomène.

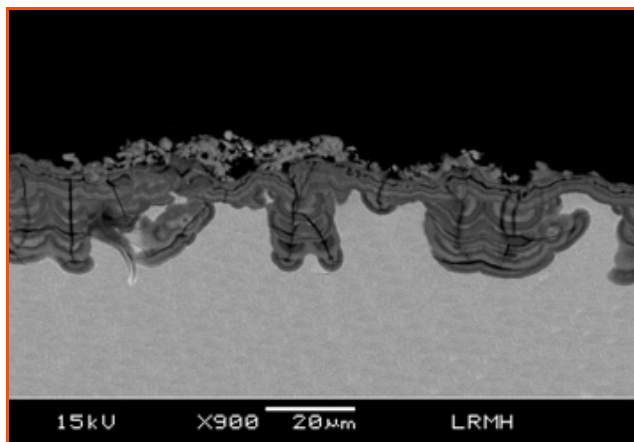


Figure 8 - Vue en coupe de la couche perturbée du verre.

Contrôle en microscope électronique à transmission

Le MET utilisé est un Philips CM20 couplé avec deux techniques d'analyses : la microanalyse EDX et la spectroscopie de perte d'énergie d'électrons transmis (EELS : « electron energy loss spectrometry »). La première technique permet d'obtenir une microanalyse élémentaire de la zone prélevée et le principe de la seconde repose sur la mesure de la perte d'énergie des électrons incidents, permettant la reconnaissance, le dosage et la détermination de la forme chimique des éléments présents et responsables des pertes caractéristiques.

Les échantillons ont été préparés par microclivage (couche mince, multicouche...). À l'aide d'une pointe diamantée, la surface a été rayée puis les éclats en biseau, dont certains très minces, ont été récupérés sur une grille en cuivre. Celle-ci a été ensuite placée dans un porte-objet qui permet, avec la platine goniométrique, d'orienter l'un ou

l'autre des fragments de telle sorte que le plan des couches soit parallèle au faisceau d'électrons incidents. Après orientation, une coupe transversale de la structure multicouche a été observée.

Les résultats des microanalyses par EDX montrent que le verre témoin présente un profil chimique moyen comme indiqué sur le tableau IV et la figure 9a.

Tableau IV - Résultats quantitatifs de l'analyse élémentaire du verre témoin.

CL : coefficient de Cliff Lorimer.

Élément	Raie	keV	Rapport CL	% massique	% atomique
O	KA1	0,523	2,3200	26,18	42,71
Si	KA1	1,740	1,0000	23,30	21,66
K	KA1	3,313	1,3500	26,19	17,49
Ca	KA1	3,691	1,3600	17,09	11,13
Mn	KA1	5,898	1,4700	0,73	0,35
Al	KA1	1,487	1,0400	0,73	0,71
Mg	KA1	1,254	1,3000	1,85	1,99
Na	KA1	1,041	1,7000	2,23	2,53
P	KA1	2,013	1,2500	1,70	1,43
Total			0,0000	100,00	100,00

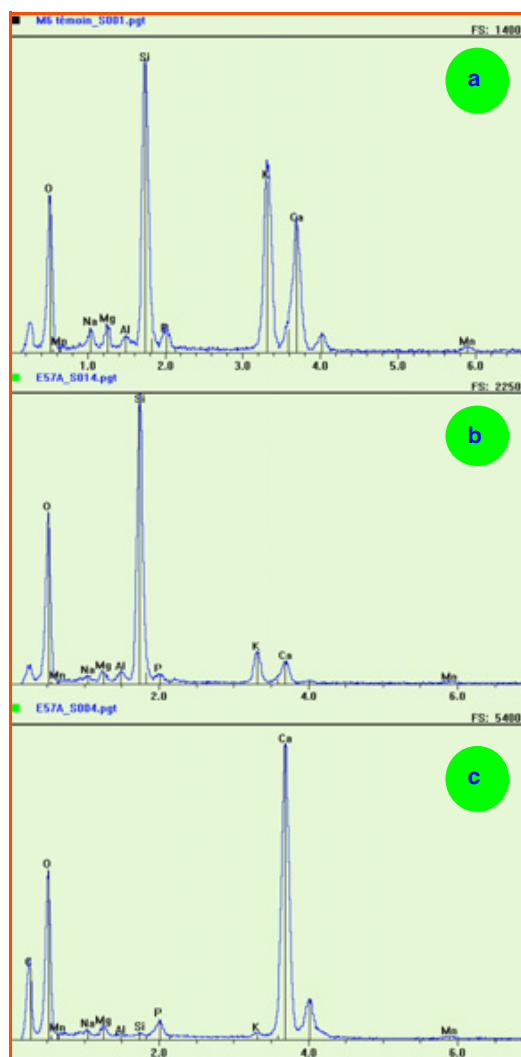


Figure 9 - Spectre EDX a) du verre témoin, b) de la zone altérée par la bactérie E57A, c) de la particule de carbonate de calcium formé.

Tableau V - Résultats quantitatifs de l'analyse élémentaire du verre altéré.

CL : coefficient de Cliff Lorimer.

Élément	Raie	keV	Rapport CL	% massique	% atomique
O	KA1	0,523	2,3200	47,65	63,11
Si	KA1	1,740	1,0000	34,20	25,81
K	KA1	3,313	1,3500	5,50	2,98
Ca	KA1	3,691	1,3600	6,43	3,40
Mn	KA1	5,898	1,4700	0,49	0,19
Al	KA1	1,487	1,0400	1,25	0,99
Mg	KA1	1,254	1,3000	1,34	1,16
Na	KA1	1,041	1,7000	0,91	0,84
P	KA1	2,013	1,0607	2,23	1,52
Total			0,0000	100,00	100,00

Tableau VI - Résultats quantitatifs de la microanalyse élémentaire de la particule minérale.

Élément	Raie	keV	Rapport CL	% massique	% atomique
O	KA1	0,523	2,3200	37,71	50,33
Si	KA1	1,740	1,0000	0,14	0,11
K	KA1	3,313	1,3500	0,20	0,11
Ca	KA1	3,691	1,3600	45,61	24,30
Mn	KA1	5,898	1,4700	0,31	0,12
Al	KA1	1,487	1,0400	0,00	0,00
Mg	KA1	1,254	1,3000	1,02	0,90
Na	KA1	1,041	1,7000	0,62	0,58
P	KA1	2,013	1,2500	1,86	1,28
C	KA1	0,277	2,0500	12,53	22,28
Total			0,0000	100,00	100,00

Le tableau V donne l'analyse élémentaire du verre altéré. Le spectre associé (figure 9b) montre que le brunissement du verre s'accompagne d'un appauvrissement en éléments potassium, calcium, phosphore et sodium. Parallèlement, on constate l'apparition de particules minérales, comme le carbonate de calcium et le phosphate de calcium (tableau VI et figure 9c). Cependant, aucun enrichissement en manganèse n'a été détecté.

L'analyse par spectroscopie de perte d'énergie d'électrons transmis n'a pas permis de déceler le degré d'oxydation du manganèse. Cependant, cette technique a montré que l'environnement chimique autour de l'atome Mn a changé.

Des études récentes ont montré que certains micro-organismes sont capables, à l'aide d'un système enzymatique complexe - peroxydase, multicuivrique oxydase (MCO, « multicopper oxidase ») et laccase - d'oxyder Mn^{2+} en Mn^{3+} et Mn^{4+} [8].

Le brunissement du verre, obtenu au bout de trois semaines de culture bactérienne, correspond à une modification de l'environnement chimique du manganèse. Toutefois, aucune forme intermédiaire de Mn^{3+} n'a été observée. Actuellement, cette forme chimique est en cours de caractérisation.

Conclusions et perspectives

Dans cette étude, il a été démontré que même à partir de vitraux conservés depuis plusieurs années en dépôt, il est possible de réactiver une flore bactérienne spécifique impliquée dans l'oxydation du manganèse. Les isolats majoritaires

appartiennent à l'espèce *Burkholderia cepacia*. Les simulations, d'abord sur milieux synthétiques puis sur verres modèles, ont permis de vérifier qu'en présence d'ions manganésés et après trois semaines de culture, ces bactéries sont capables de former des dépôts noirs résultant d'une modification de l'environnement chimique du manganèse, avec une accélération de la réaction en présence de détergent à pH neutre.

Les investigations se poursuivent avec des temps de culture plus longs, dans le but de finaliser le processus, d'obtenir une oxydation nette du manganèse et de suivre les différentes étapes de cette transformation.

Cette meilleure compréhension du phénomène de brunissement ainsi que la possibilité de le recréer représentent une avancée dans la connaissance des problèmes d'altération des vitraux anciens et pourront aider ultérieurement à la mise en place de nouveaux outils de conservation (traitements biocides, élimination enzymatique, inhibition du processus...).

Remerciements

Les auteurs remercient Jaâfar Ghanbaja, directeur du service commun de microscopie électronique de l'UHP de Nancy pour la réalisation des microanalyses EDX.

Références

- [1] Krawczyk-Bärsch E., Däbritz S., Hauße W., *The darkening of medieval glass by oxidation of manganese*, Conservation commune d'un patrimoine commun, 2^e Colloque du Programme franco-allemand de recherche pour la conservation des monuments historiques, 1996, p. 73.
- [2] Torge M., Müller W., Adam K., Köcher C., *Browning of glasses by oxidation of manganese*, Conservation commune d'un patrimoine commun, 2^e Colloque du Programme franco-allemand de recherche pour la conservation des monuments historiques, 1996, p. 47.
- [3] Barbey P., Sterpenich J., Libourel G., *Altération des vitraux : produits d'altération, états d'oxydation du manganèse, effets des traitements de surface*, 2^e Colloque du Programme franco-allemand de recherche pour la conservation des monuments historiques, 1996, p. 61.
- [4] Krumbain W.E., Gorbushina A.A., Rudolph C., Warscheid T., *Investigations biologiques sur le problème des biocorrosions et des dépôts biogènes des vitraux de la Cathédrale de Troyes et de l'Église Sainte-Catherine d'Oppenheim sous l'influence de l'eutrophication organique et inorganique de l'atmosphère*, Conservation commune d'un patrimoine commun, 1^{er} Colloque du Programme franco-allemand de recherche pour la conservation des monuments historiques, 1993, p. 269.
- [5] Pérez-y-Jorba M., Dallas J.P., Bauer C., Bahezre C., Martin J.C., *Deterioration of stained glass by atmospheric corrosion and microorganism*, *Journal of Materials Science*, 1980, 15, p. 1640.
- [6] Rousseau-Djabri M.-F., Jaunet A.-M., Robert M., *Corrosion des verres : rôle des bactéries et des sécrétions dans les phénomènes de dissolution et de brunissement*, Conservation commune d'un patrimoine commun, 2^e Colloque du Programme franco-allemand de recherche pour la conservation des monuments historiques, 1996, p. 55.
- [7] Thorseth I.H., Furnes H., Heldal M., *The importance of microbiological activity in the alteration of natural basaltic glass*, *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 1992, 56, p. 845.
- [8] Tebo B.M., Johnson H.A., Mac Carthy J.K., Templeton A.S., *Geomicrobiology of manganese (II) oxidation*, *Elsevier trends in microbiology*, 2005, 13(9), p. 421.



G. Oriol

Geneviève Oriol et Faisl Boust sont ingénieurs au Pôle microbiologie et **Claudine Loisel** est ingénieur au Pôle vitrail du Laboratoire de recherche des monuments historiques de Champs-sur-Marne*.



F. Boust

Thomas Warscheid est microbiologiste et chef du Laboratoire LBW, Bioconsult (Allemagne)**.



C. Loisel

* Laboratoire de recherche des monuments historiques, 29 rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne.
Courriels : genevieve.oriol@culture.gouv.fr, faisl.boust@culture.gouv.fr, claudine.loisel@culture.gouv.fr

** Laboratoire LBW Bioconsult, Schwarzer Weg 27, 26215 Wiefelstede (Allemagne).
Courriel : lbw.bb@gmx.de