

LA DÉGRADATION DU VERRE DANS LES COLLECTIONS DE SPÉCIMENS EN FLUIDE. ÉTUDE DE LA COLLECTION ARIËNS KAPPERS CONSERVÉE AU MUSÉE VROLIK, AMSTERDAM

Ash Dupuis

Résumé

Cet article porte sur les phénomènes d'altération chimique et physique affectant les contenants en verre des collections de spécimens en fluide. En s'appuyant sur une collection du début du XX^e siècle conservée au Vrolik Museum d'Amsterdam, il a été possible d'établir un nouveau modèle d'altération spécifique aux verres de format rectangulaire utilisés dans les collections en fluide, mettant en avant les interactions entre altérations chimiques et physiques. Des récipients en verre très dégradés ont été étudiés à l'aide d'outils variés : cet article se concentrera sur l'étude fractographique, les observations sous polariscope et les analyses réalisées au microscope électronique à balayage couplé à la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (MEB-EDS). Cette étude a permis de mettre en évidence les forces physiques affectant les parois des contenants et leurs interactions avec l'altération chimique du verre.

Abstract This article examines the chemical and physical degradation phenomena affecting the glass containers in fluid specimen collections. Drawing on an early 20th century collection housed at the Vrolik Museum in Amsterdam, a new degradation model specific to the rectangular glass vessels used in fluid collections has been developed, highlighting the interactions between chemical and physical alterations. Highly degraded glass containers were studied using various methods; this article focuses on fractographic analysis, observations under a polarising microscope, and analyses performed with a scanning electron microscope coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). The study reveals the physical forces impacting the container walls and their interplay with the chemical deterioration of the glass.

Resumen Este artículo trata de los fenómenos de alteración química y física afectando los frascos de vidrio que contienen especímenes conservados en fluido. Estudiando una colección de principios del siglo XX conservada en el Vrolik Museum de Amsterdam, fue posible establecer un nuevo modelo de alteración específica de los frascos rectangulares utilizados para colecciones en fluido, notando las interacciones entre alteraciones químicas y físicas. Recipientes de vidrio muy degradados fueron estudiados con varios útiles; este artículo se concentra sobre el estudio fractográfico, las observaciones mediante un polaroscopio y los análisis realizados con un microscopio electrónico acoplado a la espectroscopía de rayos X a dispersión de energía (MEB-EDS). Este estudio permitió de poner en evidencia las fuerzas físicas que afectan las paredes del frasco y sus interacciones con la alteración química del vidrio.

Mots-clés altération du verre, spécimens en fluide, anatomie, histoire naturelle, forces physiques, stress résiduel, lixiviation, fractographie, polariscope, MEB-EDS

Introduction

Cet article est tiré d'un mémoire de fin d'étude en conservation-restauration, soutenu à la Haute-École Arc de Neuchâtel, en août 2023. Il a été réalisé en partenariat avec le musée Vrolik d'Amsterdam, où est conservée la collection de cerveaux du professeur Ariëns Kappers, sujet du mémoire.

Histoire de la collection

Assemblée au cours de la première moitié du XX^e siècle, la collection de cerveaux du professeur Cornelius Ubbo Ariëns Kappers, premier directeur de l'Institut de neuroscience des Pays-Bas entre 1908 et 1946, est considérée comme l'une des plus anciennes et complètes au monde. C'est sur cette collection que le professeur a basé ses recherches pionnières en la matière (Eling, Hofman, 2014, p. 110-111).

Cette collection comportait à ses débuts 500 spécimens en fluide, d'origine animale principalement, issus du monde entier (Hofman, Johnson, 2011, p. 65). Cependant, seulement 292 de ces flacons nous sont parvenus, impliquant une perte de 42 % de la collection en 78 ans. Les contenants restants sont en majeure partie de base carrée ou rectangulaire et de formats divers, allant de 5x5x13 cm à 12x12x20,5 cm. Bien que l'origine de cet appauvrissement important soit difficilement identifiable en l'absence d'archives, les quatre déménagements de la collection au cours de son histoire y sont peut-être pour quelque chose. Le dernier en date a eu lieu en 2016 lors du transfert définitif du fonds au musée Vrolik d'Amsterdam. La collection n'étant plus utilisée pour l'enseignement et la recherche, mais gardant une valeur historique importante, sa patrimonialisation a été décidée conjointement entre l'institut et le musée.

Objectifs de l'étude

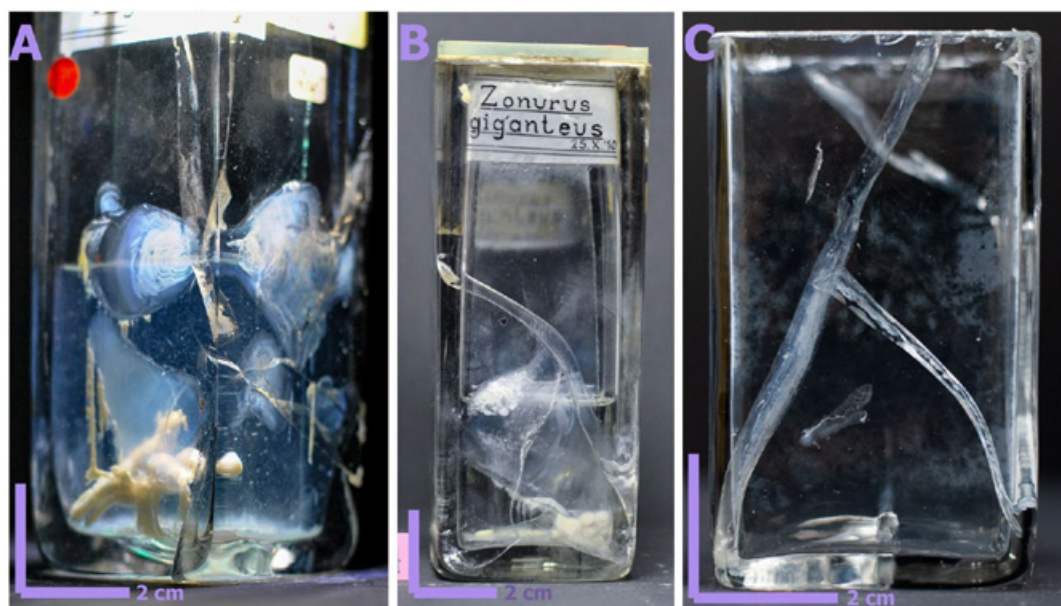


Figure 1 Exemples de flacons altérés de la collection de cerveaux du professeur Ariëns Kappers. Le cliché A correspond au contenant VGP14, présentant les altérations les plus avancées. Les clichés B et C représentent respectivement les flacons VGP4 et VGP45. Ce dernier a été vidé préalablement à la prise de vue. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

En amont du projet, une première étude de la collection par Inge Dijkman, conservatrice-restauratrice de spécimens en fluide au musée Vrolik, a permis d'établir un constat préliminaire : 55 des 292 flacons restants présentent des altérations du verre très avancées. Ces dernières se caractérisent par d'importantes fractures et fissurations, associées à un blanchissement des surfaces de fracture, engendrant une perturbation visuelle importante, une perte des fluides de conservation, divers précipités et efflorescences (**fig. 1**).

À partir de ce constat, le musée souhaitait savoir s'il était possible d'envisager une intervention de conservation curative des flacons de manière à ce qu'ils puissent continuer à contenir les spécimens en fluide sur le long terme. Bien que la conservation du spécimen prime sur la conservation du contenant, ce dernier s'inscrit dans un ensemble et représente un document informant l'histoire matérielle de la collection. Si possible, il convient donc de le conserver et de le garder associé au spécimen. Pour répondre à cette question, deux axes de recherche ont été établis.

Le premier vise à mieux comprendre les phénomènes de dégradation affectant les contenants en verre des collections de spécimens en fluide, question encore peu investie par la conservation-restauration. L'objectif de cette étude est d'explorer une hypothèse de départ selon laquelle deux types de mécanisme de dégradation entreraient en jeu : des mécanismes physiques liés à des changements de pression internes et des mécanismes chimiques liés à la part aqueuse des fluides de conservation, l'étendue de leurs interactions étant jusqu'alors inconnue.

Le second axe de recherche, qui n'est pas présenté dans cet article, se penche sur l'étude de la compatibilité entre les polymères utilisés pour la conservation-restauration du verre historique et les fluides de conservation; ce qui constitue une première étape logique vers l'établissement d'un protocole de conservation curative.

Au-delà de la volonté de restaurer cette collection, étudier ces phénomènes d'altération représente un intérêt scientifique majeur. En effet, peu de recherches ont été menées sur le sujet, bien que ces altérations puissent potentiellement toucher l'ensemble des contenants en verre présents dans les collections de spécimens en fluide. Mieux connaître ces mécanismes est une étape nécessaire pour assurer la préservation sur le long terme des spécimens et des flacons qui les contiennent.

Étude des altérations

Pour cette étude, 66 flacons ont fait l'objet d'observations approfondies et de constats d'état détaillés. Ont été sélectionnés les 55 verres présentant d'importantes dégradations et 11 autres servant de comparaison. Ont été considérés uniquement les contenants rectangulaires de base carrée, puisqu'ils sont les plus altérés et considérés comme représentatifs de la majorité des verres de la collection. Cette typologie de flacons était probablement destinée initialement à la chromatographie, mais leurs faces planes en font des contenants particulièrement appropriés pour le stockage de spécimens en fluide; comparés aux récipients circulaires plus anciens : ils limitent les déformations optiques des spécimens lorsqu'ils sont observés à travers le verre. Enfin, le corpus d'étude a intégré plusieurs flacons vides ayant été dissociés de leurs spécimens. Ces verres ont principalement été utilisés pour les observations sous lumière polarisée.

De manière générale, la paroi par laquelle le spécimen est destiné à être observé est polie et l'arrière du flacon est peint en noir sur la face extérieure. Les spécimens reposent simplement au fond du flacon ou sont montés sur des plaques de verre. Les lèvres des contenants sont plates et abrasées et les couvercles sont de simples rectangles de verre collés par un silicone transparent ou un mastic blanc.

Mécanismes physiques de dégradation

Polariscope



Figure 2 Polariscope construit pour cette étude. La source lumineuse est à l'arrière, le flacon observé est placé entre les deux filtres. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

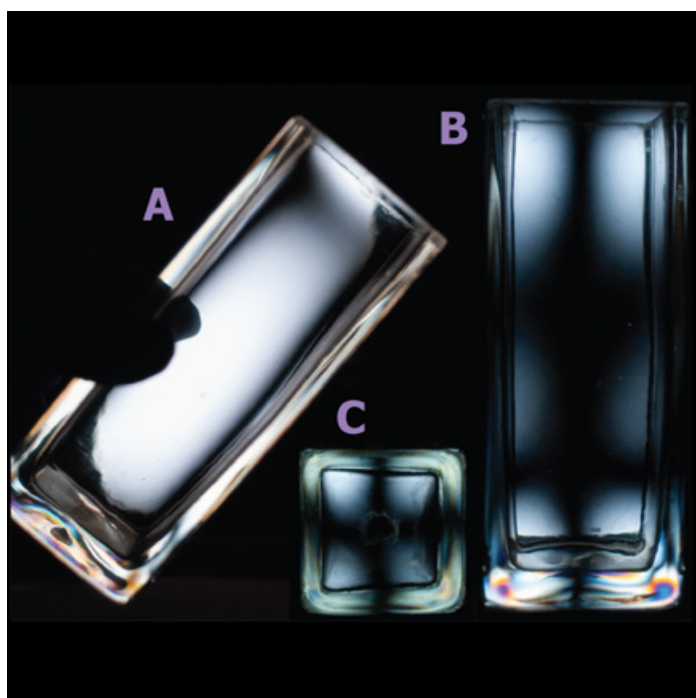


Figure 3 Flacon vide associé à la collection. Les zones blanches et colorées indiquent une biréfringence du verre trahissant la présence de tensions internes au matériau. Les prises de vue B et C montrent une concentration des tensions au niveau des arrêtes et des angles. La prise de vue A montre le même flacon, penché, mettant en avant la présence de tensions résiduelles à travers toute la paroi en verre. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

Le premier outil utilisé pour l'étude des mécanismes physiques de dégradation est un polariscope. Il s'agit d'un appareil utilisant la lumière polarisée pour rendre visibles les tensions au sein d'un matériau transparent. Quand le verre est contraint, ce dernier devient biréfringent - il a deux indices de réfraction (Redner, 1995, p. 180). Bien que des polariscopes de qualité industrielle existent, un appareil fabriqué à la main en laboratoire était suffisant pour révéler les zones sous tension des flacons. Il se compose d'une source lumineuse uniforme et de deux films polarisants appliqués sur des plaques de verre. La source lumineuse est située à l'arrière. La lumière traverse un premier filtre, puis l'objet, puis un second filtre (fig. 2). Les observations se font à travers le deuxième filtre : les zones biréfringentes du verre sont mises en avant par la lumière et apparaissent blanches ou colorées, tandis que le reste du flacon n'est pas illuminé et demeure noir (fig. 3). Le détail des éléments utilisés est disponible dans les annexes du mémoire (Dupuis, 2023, p. 127).

Les observations ont été effectuées sur les flacons vides conservés avec la collection, ainsi que sur certains contenants ayant encore leurs spécimens. L'arrière des flacons en utilisation étant peint, les meilleures observations ont été faites sur les flacons vides.

De cette manière, des tensions résiduelles ont pu être mises en avant au sein du verre. Elles sont principalement localisées au niveau des coins et des arêtes des flacons, mais les parois peuvent-être touchées également (fig. 3). L'origine supposée de ces tensions est technologique. En effet, les tensions principales sont localisées dans les coins et dans les arêtes, ce qui correspond aux zones où le verre est le plus contraint lorsqu'il est soufflé dans un moule. De plus, lors de la réalisation d'un objet en verre, la dernière étape (hors travail à froid) est celle du recuit. Elle consiste à refroidir lentement le verre afin d'éviter l'apparition de contraintes internes. En refroidissant, la structure amorphe du verre se resserre. Un refroidissement inégal et trop rapide empêche une restructuration homogène du réseau siliceux et engendre des tensions dites « résiduelles » dans la matière (Davison, 2003, p. 11-12; Janssens, 2008, p. 10). Ces tensions sont intrinsèques au matériau et existent indépendamment de contraintes externes.

Fractographie

La fractographie est l'étude des surfaces de fracture pour en comprendre l'origine (Quinn, 2016). Une analyse approfondie a été faite sur deux flacons, VGP60 et VGP18 (Dupuis, 2023, p. 54-55), appuyée par des observations complémentaires sur d'autres contenants de la collection. Ces observations ont permis d'aboutir au schéma présenté en figure 4.

Ces observations peuvent se résumer de la manière suivante : à l'échelle d'une paroi, les ondes de Wallner primaires (*primary Wallner lines*) permettent de définir la direction dans laquelle avance une fracture. Sur les contenants étudiés, les fractures se forment à la lèvre du flacon en descendant vers le bas sans forcément l'atteindre, puis continuent latéralement en traversant une ou plusieurs arêtes, avant de remonter vers la lèvre et s'y terminer, formant une fracture en forme de "U" distinctive. L'observation des ondes de Wallner secondaires (*secondary Wallner lines*) et des lignes de crête (*hackle marks*) permet de déterminer la nature des forces à l'origine de ces fractures. Ici, elles indiquent une flexion des parois s'exerçant vers l'intérieur, amenant à la compression de la surface externe du verre (*compressive side*), et à la mise sous traction de la surface interne (*tensile side*). À cette flexion est associée une torsion, interprétable grâce à la présence de lignes de crête en escalier (*step hackle marks*) (fig. 4 et 5).

Surface de fracture formée par une force de flexion avec torsion

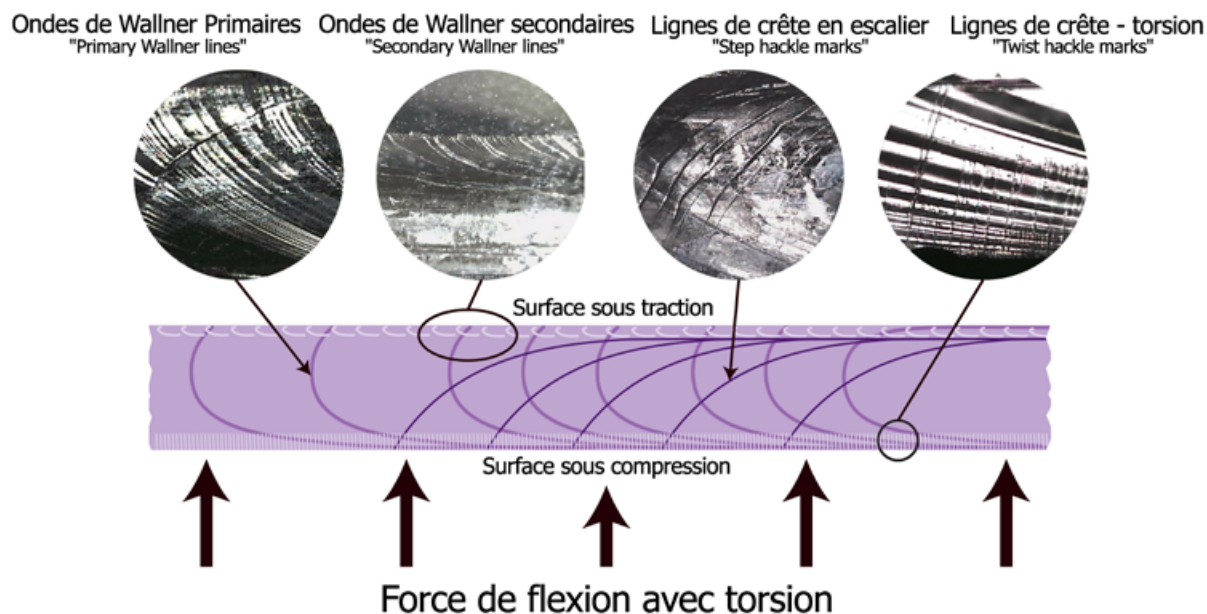


Figure 4 Schéma fractographique résumant les observations faites sur le flacon VGP60, représentatif des observations pouvant être faites sur l'ensemble des fractures de la collection. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.



Figure 5 Relevé détaillé des fractures du flacon VGP18, illustrant une organisation typique des fractures observables sur la collection. Les ronds marquent les points de départ des trois fractures. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

Ces observations sont cohérentes et confirment l'hypothèse formulée par Andries Van Dam (Van Dam, 2000), selon laquelle les fractures se forment suite à des changements de pression interne. En effet, il est supposé que lors d'une baisse de la température ambiante, le volume du liquide de conservation diminue, augmentant l'espace entre le fluide de conservation et le couvercle. Or, si le flacon est scellé hermétiquement, cet espace ne peut se remplir d'air, créant à la place un effet de vide qui se répercute sur les parois du flacon, qui se retrouvent « aspirées » vers l'intérieur. Cet effet se reporte également sur le couvercle, qui exerce alors une force de compression sur les parois (fig. 6). Cependant, l'origine des forces de torsion ressortissant de l'analyse fractographique n'est pour le moment pas bien définie. Il est possible qu'elles résultent d'une compression inégale du couvercle sur les parois en verre, ou alors de tensions résiduelles au sein du matériau, ou bien de l'épaisseur inégale des parois. Il est fort possible qu'une combinaison de ces trois facteurs en soit la source, mais des études complémentaires sont nécessaires pour s'en assurer.

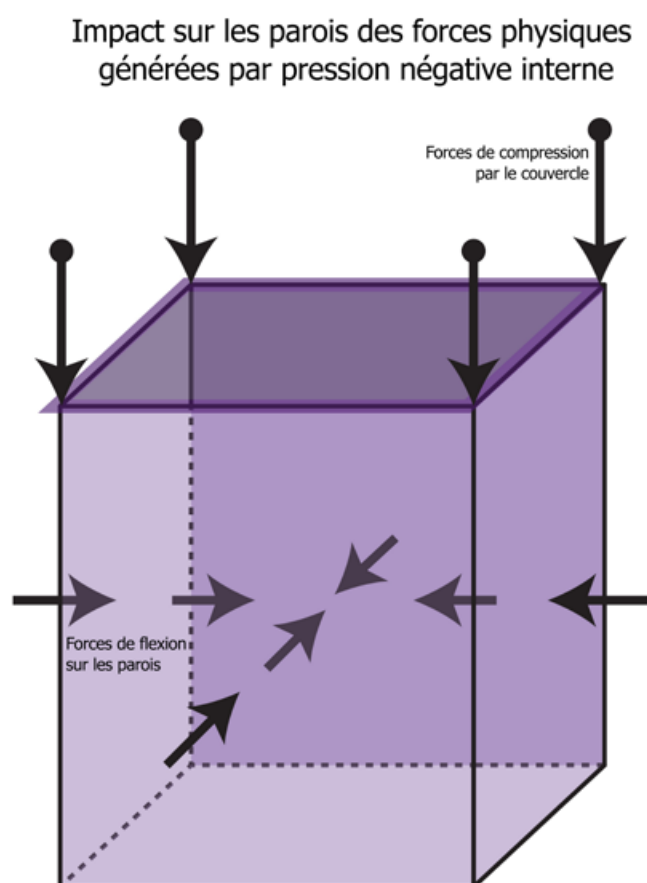


Figure 6 Schéma montrant les forces physiques appliquées sur un flacon scellé lors d'une baisse de pression interne. À ces forces s'ajoutent les possibles tensions résiduelles présentes à l'intérieur du verre suite à sa manufacture. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

Mécanismes chimiques de dégradation

L'étude des mécanismes chimiques de dégradation s'est faite principalement par observation au microscope électronique à balayage (MEB) associé à des analyses de composition via la spectroscopie par dispersion d'énergie de rayons X (EDS). L'ensemble des images et des analyses ont été réalisées en collaboration avec la Haute École d'Art de Berne par le Professeur Nadim Scherrer.

Présentation des échantillons

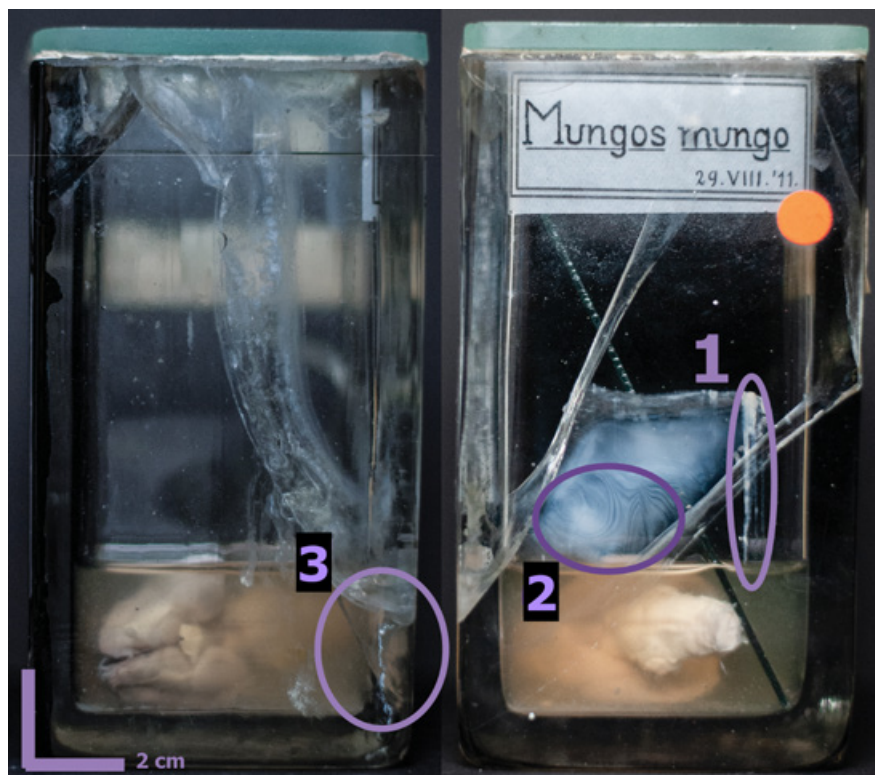


Figure 7 Emplacement des échantillons prélevés sur le flacon VGP18 pour analyses SEM-EDS. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

Pour des raisons de clarté et de synthèse, seulement trois échantillons seront présentés dans cet article, renommés échantillons 1, 2 et 3. Tous proviennent du flacon VGP18, choisi car arborant un éventail d'altérations représentatif de l'ensemble de la collection. L'échantillon 1 se présente sous la forme d'une poudre issue d'un précipité blanc se formant à l'intérieur du flacon, à l'interface entre une surface de fracture et le fluide. L'échantillon 2 est un fragment de verre prélevé sur une fracture de la face avant et a été enrobé dans une résine pour permettre l'observation en coupe de la fracture. L'échantillon 3 est un tesson déjà présent sur le flacon, localisé au coin inférieur avant-droit, qui permet l'observation et la comparaison des surfaces internes et externes de la paroi.

Observations MEB

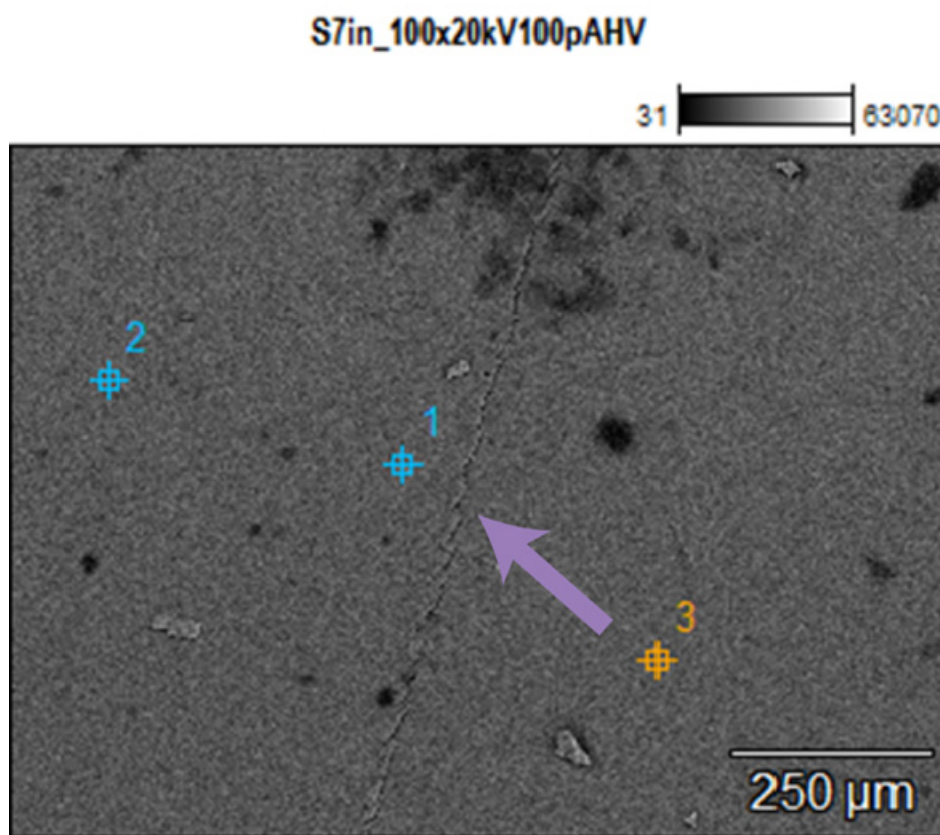


Figure 8 Image prise au microscope électronique à balayage (MEB) de la surface interne du flacon “VGP18” (échantillon 3) montrant la présence de micro-fissurations en surface, dues au phénomène de lixiviation. © Nadim Scherrer / Hochschule der Künste Bern.

L'observation des échantillons sous MEB a permis de mettre en évidence la présence de micro-fissurations en surface des parois exposées au fluide de conservation (**fig. 8**). Les observations réalisées sur la surface externe du contenant (échantillon 3) n'ont pas démontré la présence de micro-fissurations.

Il s'agit d'une altération attendue, pouvant être imputée à la lixiviation des éléments alcalins. En effet, tout verre sodocalcique est à risque lorsqu'il est conservé en milieu aqueux pendant une longue période. À l'échelle moléculaire, les ions sodium et potassium sont dissous, extraits du réseau siliceux et remplacés par des ions hydrogène. Cet échange cause la formation d'une couche d'altération en surface dite « hydratée » et engendre des contraintes mécaniques liées à l'extraction des alcalins et à la taille plus petite des ions hydrogène qui les remplacent; ceci entraîne l'apparition de micro-fissurations et la rétraction du réseau (Davison, 2003, p. 5). Le phénomène est, bien entendu, limité aux zones exposées au fluide de conservation (surface interne du flacon et surfaces de fracture).

Analyses de composition par EDX

Composants	Échantillon 2		Échantillon 3	
	Verre non-altéré	Surface de fracture	Surface interne	Surface externe
SiO ₂	73.2 - 74.56	98.25	89.60	72.02
SO ₃	0 - 0.81	-	0.88	0.59
Na ₂ O	15.59 - 15.92	-	-	17.94
K ₂ O	1.28 - 1.38	-	0.94	1.18
CaO	8.24 - 8.65	0.88	8.59	8.27
MgO	-	-	-	-
Cl	-	0.87	-	-

Figure 9 Tableau reprenant les compositions estimées d'après analyse par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS) des différentes surfaces des échantillons 2 et 3. Les données sont en pourcentage molaire (mole %), converties à partir du pourcentage massique. Résultats donnés en fourchette correspondant à plusieurs points analysés sur l'échantillon. Analyses effectuées par Pr. Nadim Scherrer à la Hochschule der Künste Bern.

L'estimation de la composition de la masse du verre ne semble pas indiquer d'instabilité particulière et reste dans la gamme de ce qui est considéré comme un verre stable : une concentration en silice supérieure à 66,7 % (molaire), une quantité totale de fondants (Na₂O et K₂O) inférieure à 20 % (molaire) et une quantité de stabilisant (CaO) du réseau entre 4 et 15 % (molaire) (Verhaar, 2018, p. 36-37).

Les résultats pour la paroi interne du verre indiquent la formation d'une couche altérée caractérisée par l'absence quasi-totale des fondants. Mais le stabilisant reste présent, ce qui peut s'expliquer par sa plus grande stabilité chimique, due à sa capacité à former deux liaisons ioniques avec le réseau siliceux (Davison, 2003, p. 5). Cette couche correspond à une surface hydratée résultant de la lixiviation des fondants. Il s'agit du profil d'altération attendu pour n'importe quel verre sodo-calcique en contact constant avec une solution aqueuse. La paroi extérieure du verre ne présente quant à elle pas d'altération notable.

Cependant, les compositions obtenues en analysant les surfaces de fracture montrent une altération plus importante, avec une lixiviation totale des fondants et une perte presque totale du stabilisant. Cela indique un niveau de dégradation chimique plus élevé, résultant d'un mécanisme d'altération complexe et beaucoup moins commun. Comme ce phénomène n'est observé qu'au niveau des interfaces de fracture, par définition des zones exiguës, il est concevable que les fondants lessivés par le fluide de conservation y soient restés partiellement emprisonnés, créant un environnement localisé et accroissant progressivement le pH. Or, le réseau siliceux est susceptible de se dissoudre (hydrolyse) quand ce dernier atteint la valeur de 9 (Verhaar, 2018, p. 29-32; Janssens, 2013, p. 21). La dissolution du réseau siliceux à l'interface entre deux surfaces de fracture est également démontrée par le spectre obtenu sur l'échantillon 1, correspondant au précipité se formant à l'interface fracture/fluide (fig. 10).

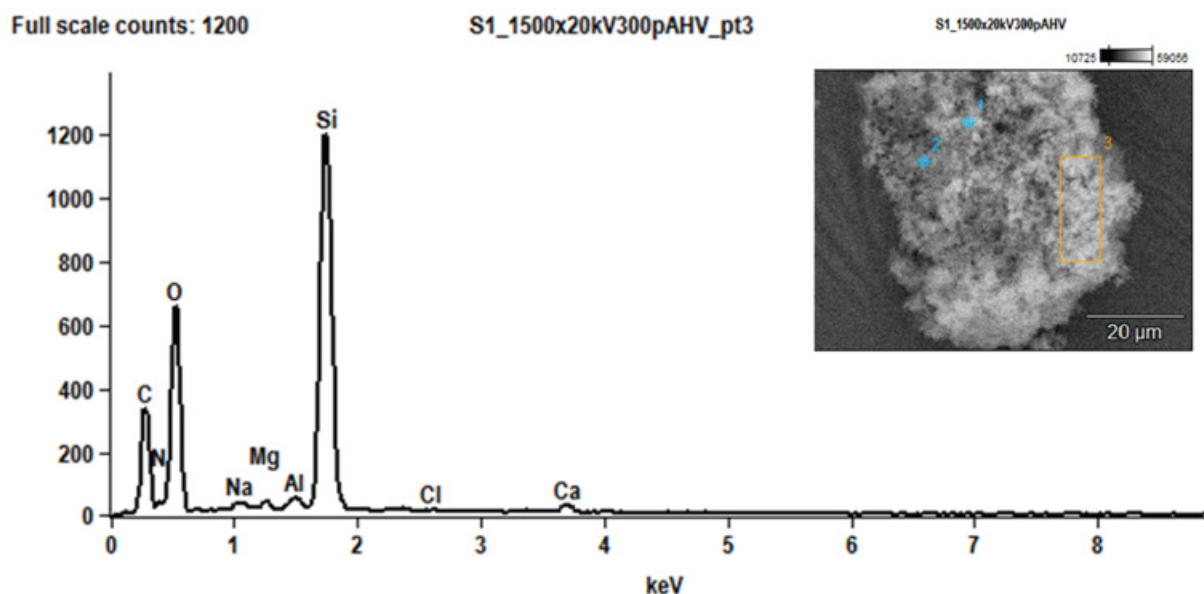


Figure 10 Spectre obtenu par EDS sur le précipité prélevé sur le flacon VGP18 (échantillon 1). Ce spectre démontre une présence importante de silice, témoin d'une dissolution du réseau siliceux au niveau des surfaces de fracture. © Nadim Scherrer / Hochschule der Künste Bern.

Proposition d'un nouveau modèle de dégradation

En combinant les résultats des études des mécanismes d'altération chimique et physique décrits ci-dessus, il est possible de proposer un système de dégradation exhaustif pour les contenants rectangulaires en verre de la collection Ariëns Kappers.

Tout d'abord, il y a une dégradation de la surface interne des parois en verre des flacons, comme les observations et analyses par SEM-EDX le démontrent. Cette altération correspond à la lixiviation des fondants résultant d'une exposition constante à un liquide de conservation aqueux. Même si la composition estimée du matériau ne semble pas indiquer une instabilité particulière, aucun verre sodocalcique n'est à l'abri d'une dégradation chimique par l'eau lorsqu'il y est constamment exposé. La couche superficielle est alors privée de ses fondants, et se forme en surface une strate d'altération à la fois hydratée et micro-fissurée. À ce stade du mécanisme de dégradation chimique du verre, la formation de cette couche ne constitue pas nécessairement une menace structurelle pour la plupart des objets. Cependant, dans le cadre des collections de spécimens en fluide, d'autres phénomènes d'altération entrent en jeu.

L'étude fractographique a permis de démontrer que les parois en verre étaient soumises à des forces de flexion allant de l'extérieur vers l'intérieur, provoquant la compression de leurs surfaces externes et l'étirement de leurs surfaces internes. Ce phénomène est causé par la formation d'une pression interne négative suite à une diminution du volume de liquide de conservation, elle-même résultant d'une baisse de température ambiante. Ce phénomène est certainement cyclique, suivant les variations de l'environnement. À cette force de flexion s'ajoutent d'autres forces physiques, provenant des contraintes résiduelles présentes au sein du verre, ainsi que des forces de compression engendrées par le couvercle, attiré vers l'intérieur par la pression négative. *In fine*, l'altération chimique des parois est telle qu'elles ne

sont plus en mesure de résister aux forces physiques auxquelles elles sont soumises et se fracturent.

Sans interventions de conservation-restauration rapides, les surfaces de fracture nouvellement formées sont à leur tour exposées à l'eau contenue dans le fluide de conservation et attaquées chimiquement. Au fur et à mesure que la désalcalinisation progresse, les éléments lixivifiés du verre restent présents en plus grande quantité entre les deux surfaces, augmentant le pH localement. Lorsqu'un pH de 9 ou plus est atteint, le réseau de silice est susceptible de se dissoudre, et des précipités se forment dans le fluide de conservation à l'interface entre la paroi et le liquide. Plus la surface de fracture est importante, plus le degré d'altération chimique observé est important, ce qui suppose que plus la surface de fracture est importante, plus il est difficile pour les éléments alcalins de s'en extraire.

Enfin, il est certain que d'autres facteurs entrent en jeu dans les mécanismes d'altération décrits ci-dessus, comme par exemple la composition exacte du fluide de conservation ou l'ampleur des variations de température. Cependant, l'étude de ces paramètres était en dehors du champ de ce projet et des études complémentaires sont nécessaires pour compléter le schéma proposé.

Conclusion

Pour conclure, cette étude a permis de mettre en évidence la spécificité des phénomènes d'altération affectant les contenants en verre des collections de spécimens en fluide et a abouti à la proposition d'un premier modèle mettant en exergue les liens étroits entre mécanismes chimiques et mécanismes physiques de dégradation. Pour ce faire, elle s'est basée sur des observations macroscopiques et microscopiques, sur des analyses physico-chimiques, ainsi que sur les connaissances déjà établies au sujet de la dégradation des verres historiques et archéologiques.

En plus de compléter ces savoirs, cette étude contribue à l'ouverture d'un nouveau champ de recherche pour la conservation-restauration : celui de la dégradation des contenants en verre dans les collections de spécimens en fluide. Mais il s'agit avant tout d'une première étape : le modèle proposé a pour vocation d'être complété, revu et questionné par de futures recherches.

Références bibliographiques

Davison S. (2003), *Conservation and restoration of glass*, 2^e édition, Oxford, Butterworth-Heinemann, 392 p.

Dupuis A. (2023), *A brain teaser: investigating the chemical and physical alteration mechanisms of glass in fluid collections and their conservation implications for the Ariëns Kappers Brain Collection*, mémoire de Master of Arts HES-SO en Conservation-restauration, orientation objets archéologiques et ethnographiques, Haute-École Arc, 177 p.

Eling P., Hofman M. (2014), « The Central Institute for brain research in Amsterdam and its directors », *Journal of the history of the neurosciences*, Vol. 23, N° 2, p. 109-119.

Hofman M., Johnson J. (2011), « The C. U. Ariëns Kappers brain collection », *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1225, n° S1, p. E64-E84.

Janssens K. (2013), *Modern methods for analyzing archaeological and historical glass*, Vol. 1, Chichester, John Wiley & Sons Inc, 690 p.

Quinn G. (2016), *Fractography for ceramics and glass*, 2^e édition [en ligne], National Institute of standards and technology, U.S. Department of commerce. Disponible sur : <https://doi.org/10.6028/NBS.SP.960-16> (consulté le 22 mars 2025).

Redner A. (1995), « Measuring stress in glass production: a key quality control operation », *Glass production technology international*, p. 180-195.

Van Dam A. (2000), « The interaction of preservation fluid, specimen container, and sealant in a fluid collection », *Collection Forum*, Vol. 14, p. 78-92.

Verhaar G. (2018), *Glass sickness: detection and prevention*, Amsterdam, université d'Amsterdam, 224 p.

L'auteur

Ash Dupuis Conservateur-restaurateur indépendant ;
conservatrice-restauratrice indépendante,
ash.dupuis.cr@gmail.com