

L'ANOXIE

Une très grande part des œuvres que nous prenons en charge est constituée au moins partiellement de bois, et de ce fait, nous sommes depuis toujours confrontés au problème des attaques d'insectes xylophages et de champignons lignivores.

L'objectif qui nous préoccupe avant tout est de réussir la transmission aux générations futures des œuvres qui nous sont confiées. Cette mission essentielle est en bute permanente aux altérations provoquées par un environnement instable et néfaste, ainsi qu'aux infestations biologiques.

Pour les sculptures et le mobilier nous rencontrons deux grands types d'altérations, celles qui sont dues à des micro-organismes (champignons), et celles qui sont dues à des insectes xylophages.

Les sculptures et les meubles y sont très sujets dans leur ensemble. Bien que le bois soit très pauvre en matières nutritives, les champignons et les insectes xylophages sont capables de digérer la cellulose et la lignine qui sont ses principaux constituants. Ces organismes qui vivent dans le bois produisent des enzymes digestifs qui décomposent ces substances en sucres assimilables. Les insectes possèdent les mêmes enzymes dans leur tube digestif.

Les insectes le plus couramment rencontrés sont les Anobiidés: *Anobium punctatum* et *Xestobium rufovillosum*, les Lyctidés: *Lyctus brunneus* (qui s'intéressent plus particulièrement à l'amidon et aux sucres présent dans le bois), les Longicornes dont le Capricorne des maisons: *Hylotrupes bajulus* et les termites: *Reticulitermes lucifugus* et *Reticulitermes flavipes*.

Les infestations par les termites sont transmises par le bâti architectural. Pour les autres insectes, la contamination peut provenir d'une autre œuvre, d'un élément de la charpente, ou plus simplement par la venue d'un insecte femelle fécondé, au travers d'une fenêtre ouverte.

Suivons cet insecte : il pénètre dans la maison ou dans une salle de musée, il vole et recherche une zone calme avec une hygrométrie suffisamment élevée. Il s'approche de l'œuvre, et va rechercher un endroit adéquat non protégé par la polychromie ou par une couche de finition pour pondre, plutôt à l'arrière, ou en dessous car ces zones bénéficient d'un microclimat encore plus humide, et le bois y est souvent déjà infesté par des micro-organismes qui ont déjà transformé la cellulose en sucres assimilables. Il dépose ses œufs dans une fissure du bois pour tenter de les mettre à l'abri des nombreux prédateurs tels que les araignées, certains Hyménoptères (Chalcidiens) et autres coléoptères (*Opilo domesticus*). Après sa sortie du bois, l'insecte xylophage adulte ne mange pas, et n'a que deux objectifs: l'accouplement et la ponte de ses œufs sur un substrat adéquat.

Mais revenons aux œufs qui vont progressivement se transformer en petites larves, puis grandir jusqu'à leur maturité selon un laps de temps variable de 6 mois à 10 ans, avant de faire leur nymphose et de se transformer en pupe puis en insecte parfait. La croissance de la larve va se faire au détriment du matériau ligneux. Certains bois sont plus digestes et plus nourrissants que d'autres, par exemple le tilleul très utilisé dans la plaine du Rhin, ou encore le chêne dont l'aubier non duraminisé et sans tanin, est particulièrement apprécié par les larves des insectes xylophages. Les guildes et corporations en interdisaient l'emploi au Moyen-âge. En effet la présence d'aubier peut être l'élément déclenchant d'une infestation grave. Les larves sont lucifuges, elles ne sortent jamais hors du bois, elles découpent ses fibres à l'aide de leurs mandibules puis l'ingèrent et avancent en créant une galerie. Les particules de bois digérées sont évacuées par la larve, et elles constituent la vermoulure dont la forme, la couleur et la taille sont des éléments d'identification des insectes. Quand

l'insecte parfait sort du bois, il aura tendance à pondre à nouveau sur cet élément de bois plutôt que d'entreprendre un grand voyage.

Ainsi progressivement vont se côtoyer plusieurs générations de larves. L'infestation va être de plus en plus vigoureuse à condition d'avoir toujours de bonnes conditions climatiques, température suffisante et humidité plutôt élevée. L'attaque va s'amplifier jusqu'à destruction du matériau ligneux. Quand un élément de bois est gravement infesté, il devient source de contaminations secondaires. Ainsi progressivement, l'infestation gagne tout le bâtiment. Le grand mouvement de la vie pousse inexorablement à ce que les matériaux organiques soient progressivement infestés, altérés et détruits.

Nous devons retarder autant que possible ce recyclage naturel, en veillant à ce que les conditions climatiques ne soient pas trop favorables aux insectes, en évitant toute re-contamination, et en stoppant les infestations en cours.

Les moyens dont nous disposons sont variés et proviennent en général du milieu agroalimentaire et médical. Ils donnent des résultats contrastés et présentent certains inconvénients. Les traitements par voie liquide avec les produits du commerce modifient la matité, la couleur, et altèrent les constituants les plus fragiles (liant, pigments, feuille métallique telle l'argent qui noircit sous l'action du soufre résiduel d'un solvant mal raffiné). Rares sont les cas où l'usage d'un agent actif dans un solvant permet de stopper totalement une infestation d'insectes xylophages. De plus si la recherche de molécules biodégradables est une bonne chose pour l'environnement, ceci rend aléatoire l'efficacité d'un badigeonnage préventif car un agent actif telle la perméthrine s'altère assez rapidement.

L'action de rayonnements ionisants tels que le rayonnement gamma du Cobalt60 (développée par le Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, Arc'Nucleart) est un moyen de traitement curatif très intéressant, mais il a un effet cumulatif et n'est pas sans danger pour les constituants les plus fragiles en cas de surdosage. Sa grande qualité est la rapidité du traitement, et les œuvres peuvent rester dans leur emballage.

Les gaz bromure de méthyle et oxyde d'éthylène ont une grande efficacité tout en ayant des effets secondaires sur la matière et en étant très dangereux pour les intervenants et pour l'environnement. Toutes ces méthodes ont leur intérêt et vont continuer à être utilisées spécifiquement, mais chacune a ses contre-indications. Il devient par ailleurs de plus en plus difficile d'utiliser des gaz toxiques en milieu urbain et sur les lieux de conservation du patrimoine pour des raisons administratives et légales.

L'anoxie sous atmosphère inerte (azote, CO₂, argon, hélium) comme moyen de traitement curatif apparaît à la fin des années 1980 à l'Australian Museum in Sydney avec Gilbert et Banks, et au GCI (Getty Conservation Institute) avec Maekawa, Preusser, Lambert et Valentin, pour une opération concernant les momies du musée du Caire. L'intérêt de cette méthode est sa parfaite innocuité pour l'œuvre et l'absence d'effets cumulatifs.

Son mode de fonctionnement est une astuce ingénieuse: il n'y a aucun apport toxique, mais simplement une absence d'oxygène.

Nous allons examiner les différentes méthodes d'application de l'anoxie. Pour obtenir une absence d'oxygène, il faut en premier lieu créer une barrière entre les œuvres à traiter et l'atmosphère que nous respirons qui contient 20,9% d'oxygène et 78,06% d'azote. Nous utilisons des films dont les caractéristiques sont la résistance à l'étirement et au poinçonnement, la très faible perméabilité à l'oxygène (égale ou inférieure à 0,1 cm³ par m² par 24 h. par 1 atmosphère), la capacité d'être scellés à chaud, et un coût raisonnable. Nous découpons des laies du film, que nous scellons à l'aide d'une pince chauffante pour fabriquer une enveloppe dans laquelle est déposée l'œuvre à traiter.

L'étape suivante consiste à enlever l'oxygène qui se trouve dans l'enveloppe autour de l'œuvre. Il existe trois méthodes: celle dite statique, celle dite dynamique, ainsi qu'une troisième qui est intermédiaire entre les deux premières.

La méthode dite statique est mise en œuvre de la façon suivante: des absorbeurs d'oxygène sont placés autour de l'objet, mais sans contact. Leur capacité d'absorption est connue (par exemple 3000 cc d'oxygène (égal à 3 litres), ce qui correspond à un volume de 15 litres d'air), et le nombre d'absorbeurs sera proportionnel au volume de l'enveloppe. C'est une méthode simple d'application qui est intéressante à utiliser dans des lieux contaminés, pour des objets de petite taille. Exceptionnellement, une œuvre plus grande peut être traitée, par exemple un piano dans une enveloppe jusqu'à deux mètres cube.

La méthode dite dynamique permet de traiter des œuvres de grande taille, ou même des ensembles de sculptures pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines ou centaines de mètres cube. Le système s'affranchit des absorbeurs par l'utilisation de sources puissantes d'un des gaz inertes très purs cités précédemment, c'est-à-dire soit du gaz liquéfié à très basse température, soit du gaz sous haute pression (200 bars), ou encore du gaz fourni en continu par un générateur.

-Le gaz inerte que nous utilisons au Centre Régional de Restauration et Conservation des Œuvres d'art de Franche-Comté est l'azote (N₂). Ce gaz est anhydre lorsqu'il sort du générateur ou de ses bouteilles d'acier. Aussi est-il indispensable de l'humidifier pour éviter de faire varier l'humidité relative (HR) dans l'enveloppe autour des objets infestés. Nous utilisons un système de barbotage dans lequel l'azote se charge de vapeur d'eau. L'air de l'enveloppe est ainsi dilué à l'aide du gaz inerte pour en diminuer la teneur en oxygène. Cette dilution est séquencée: on gonfle l'enveloppe jusqu'à une très légère surpression, puis on arrête l'injection d'azote. L'atmosphère de l'enveloppe se mélange à l'azote injecté, puis on entrouvre l'enveloppe pour la vider, soit en exerçant une légère pression sur le film, soit en connectant une pompe à vide, et ce sans réaliser de dépression. Puis on recommence l'opération jusqu'à ce que le taux d'oxygène résiduel soit très faible, en dessous de 0,1%. Le nombre de dilutions dépend du rapport entre le volume maximum de la poche et celui occupé par les œuvres. Supposons que le rapport soit de deux; à chaque dilution, le taux d'oxygène pourra diminuer de moitié, ce qui nous donnera les valeurs suivantes approximatives: 20%, 10%, 5%, 2,5%, 1,25%, 0,6%, 0,3%, 0,15%, 0,08%, 0,04% etc...; il faut donc environ huit dilutions pour arriver à un taux inférieur à 0,1%.

On constate une légère remontée du taux d'oxygène après une nuit, et nous considérons qu'elle est provoquée par l'oxygène captif dans les cellules du bois. D'une à trois dilutions supplémentaires sont nécessaires pour retrouver un taux résiduel d'oxygène suffisamment bas. Que se passe-t-il quand les insectes sont enfouis profondément dans le bois? Lambert et Maekawa (GCI) ont étudié ce problème et n'ont pas trouvé de différence significative entre un bloc de bois courant et un bloc de bois épais recouvert d'un film de laque à l'intérieur desquels se trouve une population d'insectes. Rust et Kennedy concluent que l'enfouissement profond des insectes dans le bois n'augmente pas de manière significative le temps requis pour une complète extermination par anoxie. Nous passons alors dans la phase d'entretien de l'enveloppe, avec l'injection d'un faible flux d'azote dont la fonction est de compenser la perméabilité du film et de compenser les micro-fissures et micro-fuites sur les différentes connexions. Avec une enveloppe de qualité, soit quelques dilutions sont suffisantes pour la durée du traitement, ou alors on injecte un faible flux de quelques litres par minute en continu. Avec le taux de perméabilité du film, la surface utilisée, la durée du traitement, on peut calculer la quantité d'oxygène qui pénètre dans l'enveloppe.

L'utilisation de générateurs puissants permet de simplifier les opérations. Le gaz inerte est injecté dans l'enveloppe, et le mélange gaz inerte/atmosphère de l'enveloppe est évacué par une sortie afin d'éviter toute surpression de l'enveloppe.

Une fois le bon taux atteint, entrée et sortie peuvent être fermées.

Quel est le protocole à suivre pour mener à bien un traitement de désinsectisation par anoxie?

- La température doit être comprise entre 20 et 25 ° C.. Selon Nieves Valentin, pour *Anobium punctatum*, le temps d'exposition est d'un jour pour une température de 40°C, et il est multiplié par sept pour une température de 20°C, avec HR à 40% et à 0,03% d'oxygène résiduel.
- L'humidité relative doit être stabilisée au même taux que celui du lieu où se trouvait l'œuvre initialement, en général entre 50 et 65%, ce qui peut rendre problématique l'efficacité du traitement. En effet la mortalité est inversement proportionnelle au taux d'humidité relative. Selon Jay, Arbogast et Pearman, pour la Red Flour Beetle, la mortalité passe de 100 à 10% quand HR varie de 10 à 70%, expérience réalisée en 24 heures à 26°C avec 1% d'oxygène résiduel.
- La concentration résiduelle de l'oxygène doit être inférieure ou égale à 0,1%.
- La durée du traitement au taux de 0,1% doit avoir une durée de trois semaines.
- Les insectes, leurs larves et leurs œufs doivent être en activité avant et pendant le traitement. Des sculptures qui se trouvent en hiver dans un lieu non chauffé ne peuvent être traités sans une phase transitoire de réchauffement. Les insectes, leurs larves et leurs œufs qui ne sont pas en activité sont quasiment en apnée (phénomène de diapause) et ne sont pas sensibles aux baisses du taux d'oxygène.

Quel est le mécanisme de la mortalité des insectes soumis à l'anoxie? D'après Charles Seiwitz et Shin Maekawa (GCI), la compréhension des mécanismes en œuvre ne sont pas simples, mais on peut relier l'augmentation de la mortalité à la dessiccation des insectes par l'intermédiaire d'organes nommés spiracles dans lesquels se font les échanges gazeux et les échanges de vapeur d'eau. La recherche d'oxygène pousse les insectes à plus d'échanges, donc à ouvrir plus les spiracles et donc à se dessécher, ce qui peut expliquer la baisse de mortalité quand l'humidité relative augmente. Mais un mécanisme autre que la dessiccation se met en route à des humidités relatives extrêmement élevées ou l'anoxie est encore efficace mais plus lente selon Donahaye.

Nous ne possédons pas actuellement de moyens diagnostiques pour valider les traitements, si ce n'est de placer des insectes et œufs témoins dans l'enveloppe et de vérifier leur état après traitement.

Mais il nous est arrivé de traiter une momie égyptienne et son sarcophage placés dans une boîte de verre dans laquelle se trouvaient des *Anobium punctatum* très visibles, signe d'une infestation très vigoureuse. Après traitement, nous constatons ne plus avoir de sorties d'insectes xylophages dans la boîte de verre, ce qui est la preuve de l'efficacité de la mise sous anoxie.

Il existe une méthode diagnostique déjà utilisée pour les termites et les capricornes par écoute, amplification et reconnaissance. Cette méthode est en cours de développement pour les Anobiidés et pour les Lyctidés. Nous l'attendons avec impatience.

Les paramètres importants sont nombreux et sont plus ou moins difficiles à suivre. Par exemple il n'est par toujours évident de maintenir une température égale ou supérieure à 20°C en hiver en France (la plupart des études ont été faites en Californie, en Australie et en Espagne).

Des expérimentations récentes (2009) menées par Dominique De Reyers et Emmanuel Maurin au LRMH (Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques) nous montrent que le délai de 3 semaines n'est pas suffisant pour atteindre 100 % de mortalité. Il est impératif d'allonger ce délai à au moins 4 semaines.

Par sécurité nous avons décidé de ne pas comptabiliser les jours où la température descend au-dessous de 20°C, d'élever si possible la température de 22 à 25°C, d'augmenter la durée du traitement à un minimum de quatre semaines voir plus, et de descendre le taux résiduel d'oxygène à un taux inférieur à 0,03%.

Nous mettons si nécessaire en œuvre un système de chauffage dans l'enveloppe.

Nous nous devons de tout mettre en œuvre pour que nos traitements soient couronnés de succès. Car si les principes de ces traitements sont simples, l'application demande une grande rigueur. De plus un protocole mal appliqué peut avoir des conséquences graves: non seulement l'objectif recherché n'est pas atteint, mais de plus les insectes survivants sont sélectionnés pour leur résistance à l'anoxie. Selon Donahaye, cette résistance est transmise à leurs descendants à plus de 80% après huit générations exposées à des atmosphères ambiantes. Il explique cette plus grande résistance par la diminution du taux de respiration, par l'augmentation du taux d'oxygène stocké, par des changements physiologiques pour empêcher la perte de l'eau, et par d'autres adaptations biochimiques.

L'avantage immense du procédé de désinsectisation par anoxie est de nous permettre d'éviter toute contamination nosocomiale dans nos ateliers laboratoires, et de traiter sans retenue toute œuvre qui présente un risque.

BIBLIOGRAPHIE

Les scientifiques qui n'apparaissent pas dans la bibliographie sont publiés ou cités par Shin Maekawa dans "Oxygen Free Muséum Cases", Research in conservation, the Getty Conservation Institute, 1998.

DAWSON J., "La lutte contre les insectes dans les musées : les méthodes chimiques", dans Bulletin Technique n°15, Institut Canadien de Conservation, Ottawa, 1992.

GERARD A., Le Centre Régional de Restauration et Conservation des Œuvres d'Art de Franche-Comté, in La conservation préventive dans les ateliers de restauration en régions, journées-débat du DESS de Conservation Préventive des Biens Culturels, CRBC cahier technique n°4, ARAAFU, Paris

MAEKAWA S. (edited by), "Oxygen Free Museum Cases", Research in conservation, the Getty Conservation Institute, 1998.

MOURIER H. et WINDING O., "Guide des petits animaux sauvages de nos maisons et jardins", Delachaux & Niestlé, Paris, 1979.

Pacaud G., "Aperçu sur la désinsectisation par anoxie sous atmosphère inerte, 1- Système statique et dynamique", lettre de l'OCIM, n°58, 1998

Pacaud G., "Aperçu sur la désinsectisation par anoxie sous atmosphère inerte, 2- Système dynamique (suite)" , lettre de l'OCIM, n°59,1998

RAMIERE R., Les principes généraux de la désinfection par irradiation gamma. Application à la désinsectisation des objets en bois, Patrimoine Culturel et Altérations Biologiques, Actes des journées d'études de la SFIC, Poitiers, 1988.

RUST M. et Kennedy J., " The Feasibility of Using Modified Atmospheres to Control Insects Pests in Museums", GCI Scientific Program Report, The Getty Conservation Institute, 1993

SELWITZ C. et MAEKAWA S., "Inert Gases in the Control of Muséum Insect Pests", Research in conservation, the Getty Conservation Institute, 1998.

SUTTER H., Holschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen, Haupt, Bern, 1986.

VERDU J., KLEITZ M., DIJOUF F., VALOT H., Le rayonnement gamma et la désinsectisation des sculptures polychromes, in La conservation du bois dans le patrimoine culturel, journées d'études de la SFIC, Besançon-Vesoul, 1990.