

CONSERVATION-RESTAURATION D'UN FRAGMENT D'AILE DE SPITFIRE SUPERMARINE MK. VII. ENTRE PATRIMOINE ARCHÉOLOGIQUE ET INDUSTRIEL : RECHERCHE SUR LA PRÉSERVATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM ET LEURS TRAITEMENTS

Ève Paillaux, Sotiris Bampitzaris, Jane Echinard, Gilles Baron,
Cesar Escobar-Claros, Magali Brunet, Luc Robbiola, Élodie Guilminot

Résumé

L'étude proposée par le laboratoire Arc'Antique porte sur la conservation d'un fragment de bord d'attaque de Spitfire de la Seconde Guerre mondiale, disparu en 1944, retrouvé en 1988 dans un fond marin et stocké dans un jardin privé. Le mauvais état de l'objet a nécessité de prendre des décisions de conservation en considérant son importance patrimoniale et ses valeurs historiques, industrielles, techniques et scientifiques. À terme, il deviendra un mémorial pour le pilote décédé lors de la mission. Le projet vise à trouver la meilleure solution pour la conservation et l'exposition, basée sur des essais de nettoyage et de traitements appropriés menés dans le cadre du projet PROCRAFT (*Protection and conservation of heritage aircraft*). Cette étude illustre la mise en œuvre d'un projet européen de conservation-restauration et l'application de la théorie de la conservation du patrimoine industriel aux artefacts archéologiques.

Abstract The study proposed by the Laboratory Arc'Antique focuses on the conservation of a fragment of a World War II Spitfire's wingtip, which was lost in 1944, rediscovered in 1988 in a marine environment, and subsequently stored in a private garden. The poor condition of the object necessitated conservation decisions that considered its heritage significance as well as its historical, industrial, technical, and scientific values. Ultimately, it is intended to serve as a memorial for the pilot who lost his life during the mission. The project aims to determine the best solution for both conservation and display, based on cleaning trials and appropriate treatments conducted as part of the PROCRAFT project (PROtection and conservation of heritage airCRAFT). This study exemplifies the implementation of a European conservation-restoration project and the application of industrial heritage conservation theory to archaeological artifacts.

Resumen El estudio propuesto por el Laboratorio ARC'Antique se centra en la conservación de una fama de ataque de Spitfire de la Segunda Guerra mundial, que desapareció en 1944 y se encontró en 1988 en un fondo marino, almacenado en un jardín privado. El mal estado del objeto requirió tomar decisiones de conservación considerando su importancia patrimonial y sus valores históricos, industriales, técnicos y científicos. Finalmente, se convertirá en un monumento para el piloto que murió durante la misión. El proyecto tiene como objetivo encontrar la mejor solución para la conservación y la exposición, basada en las pruebas de limpieza y tratamiento adecuadas que se llevan a cabo como parte del proyecto Procraft (Protección y

conservación de aeronaves del patrimonio). Este estudio ilustra la implementación de un proyecto europeo de conservación- restauración y la aplicación de la teoría de la conservación del patrimonio industrial a los artefactos arqueológicos.

Mots-clés patrimoine culturel de la Seconde Guerre mondiale, alliages d'aluminium, Supermarine Spitfire, traitement de nettoyage, conservation-restauration, artefact archéologique

Introduction - Présentation du projet PROCRAFT

La Seconde Guerre mondiale est un jalon majeur de l'aviation militaire, avec environ 14 000 avions impliqués dans des batailles épiques comme la bataille d'Angleterre (chasseurs, bombardiers et avions de transport). Malheureusement, la plupart de ces avions ont été perdus, détruits ou recyclés pendant ou après le conflit, ne laissant qu'une infime fraction d'épaves à l'air libre. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, certains des avions restant en état de fonctionnement ont été utilisés dans d'autres conflits, mais ils ont été en majorité mis au rebut, fondus ou abandonnés (Carpentier, 2022). Cependant, de nombreux vestiges archéologiques sont encore présents dans toute l'Europe, sous terre comme en mer, rares témoins de l'histoire aéronautique, matérielle et technique.

Ce patrimoine de la Seconde Guerre mondiale a une valeur historique et émotionnelle indéniable pour les Européens, mais ces vestiges archéologiques ne sont entrés que récemment dans le domaine de l'archéologie et de la conservation du patrimoine culturel (Le Maner, 2008). Leur présence dans les musées nationaux est limitée; ils sont d'ailleurs souvent pris en charge par des associations de bénévoles.

La découverte d'une épave d'avion est un *challenge* à plusieurs points de vue : sa composition et ses matériaux, son histoire, son statut juridique, sa taille et son état. Pour relever ces défis, le laboratoire Arc'Antique collabore depuis 2020 avec 4 partenaires principaux (CEMES- Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales de Toulouse, université de Bologne, université de Ferrare, université technique tchèque de Prague) et 21 partenaires associés dans le cadre du projet PROCRAFT (*Protection and conservation-restauration of heritage aircraft*). Ce sont des scientifiques, des représentants de l'État, des conservateurs, des universitaires, des musées, des associations, originaires du Canada, de Grèce, de Suède, d'Italie, de République tchèque et de France. Ils représentent tous les différents acteurs de cette chaîne patrimoniale.

Le projet PROCRAFT vise à développer des solutions innovantes pour chaque phase de préservation des avions de la Seconde Guerre mondiale, notamment :

- des techniques de conservation-restauration adaptées;
- des revêtements pour la protection en environnement non contrôlé;
- des solutions préventives adaptées aux environnements confinés ou semi-ouverts (de type hangars, etc.);
- des lignes directrices pour la conservation des alliages d'aluminium.

Ses résultats permettront :

- d'améliorer et partager les connaissances sur la conservation des avions de la Seconde Guerre mondiale, en mettant l'accent sur les alliages d'aluminium;
- de contribuer à la préservation du patrimoine aéronautique;
- de promouvoir notre travail auprès du public.

Les phases du projet PROCRAFT comprennent :

- la gestion de la coordination des différents acteurs (phase 1);
- la documentation des matériaux et des altérations des épaves d'avions de la Seconde Guerre mondiale (phase 2);
- des essais de nettoyages chimiques et mécaniques selon les états de la corrosion (phase 3);
- les études de protection de surface pour les alliages d'aluminium (phase 4) :
- des clés de compréhension de la sensibilité des alliages permettant la caractérisation de la corrosion (phase 5);
- la définition de lignes directrices pour la conservation préventive (phase 6);
- la sensibilisation du public et la diffusion des informations (phase 7).

Le fragment d'aile de Spitfire MB887, confié par le DRASSM, illustre bien les défis de la préservation de ce type de patrimoine archéologique avec :

- de grandes surfaces portant des restes de peinture d'origine;
- diverses dégradations et types de corrosion;
- des parties inaccessibles;
- un lieu de stockage non climatisé (**fig. 1**).

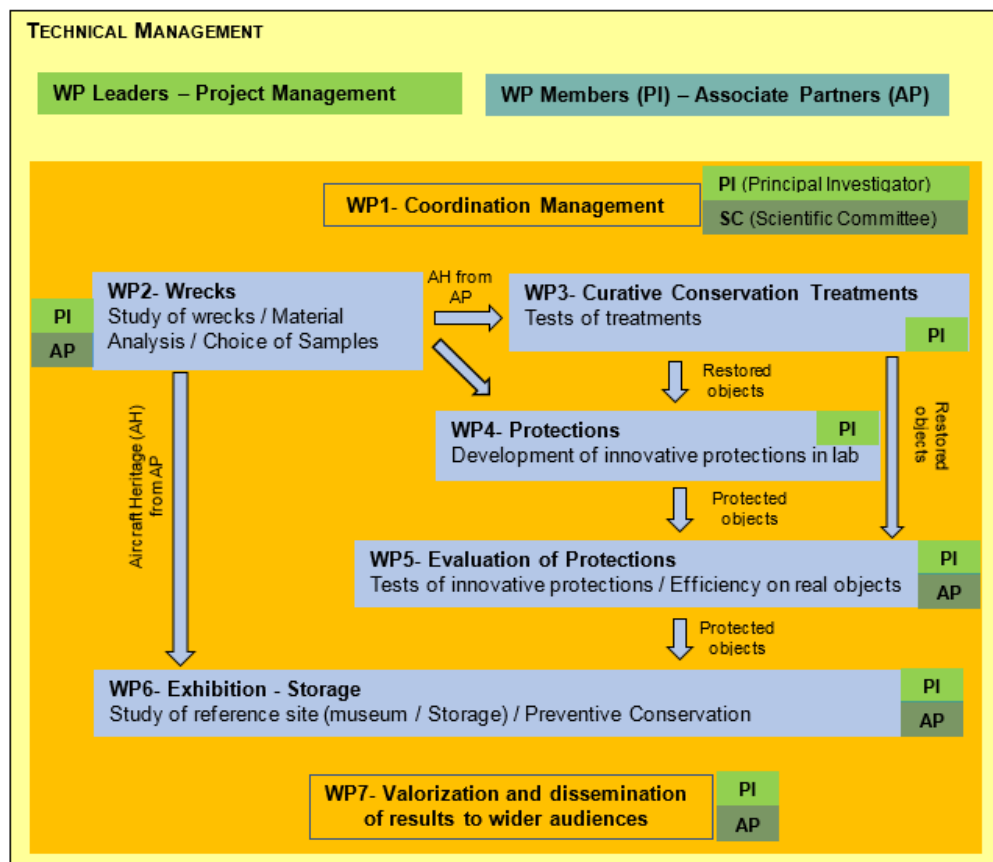


Figure 1 Organisation des phases du projet PROCRAFT. © Arc'Antique.

En raison de son importance historique et technique, les résultats des phases 3 et 5 du projet PROCRAFT ont été appliqués à la conservation-restauration du fragment du Spitfire MB887. Après un diagnostic complet, mêlant approche archéologique et technique, des tests de nettoyage ont été effectués pour déterminer les conditions de traitement adaptées. L'article décrit les différentes actions entreprises pour garantir la conservation de l'aile du Spitfire, illustrant une collaboration entre bénévoles, restaurateurs, scientifiques et représentants de l'État.

Avion Supermarine Spitfire MVII

Études historiques et techniques

Ce fragment d'aile de Spitfire a été récupéré en 1988 sur un fond marin à moins de trois miles des côtes françaises dans la Manche. Le fragment représente le bord d'attaque, la partie avant d'une aile tribord de type universel (ou type C) de Mark VII ([fig. 2](#)).

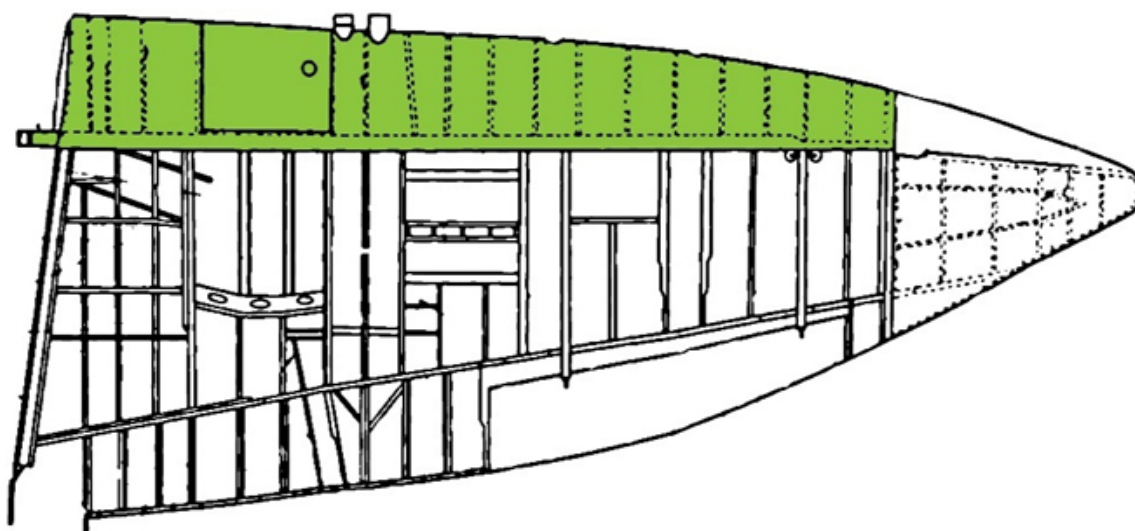


Figure 2 Schéma de la position représentée en vert du bord d'attaque tribord. © Eve Paillaux, Arc'Antique.

Les mitrailleuses ont disparu, mais certaines pièces du train d'atterrissage sont encore attachées. L'objet a été sauvé de la destruction par un bénévole qui l'a conservé pendant plus de trente ans dans son jardin. Les autorités locales, soutenues par l'Association bretonne du souvenir aérien 39-45 (ABSA 39-45) et le DRASSM, responsable de la conservation de l'objet, ont décidé de restaurer le fragment d'aile et de l'exposer en tant que mémorial en l'honneur du pilote.

Grâce à la plaque d'identification associée au fragment de l'aile, les membres de l'association ABSA 39-45 ont pu retrouver dans les archives les informations liées au pilote et à sa mission. Le 1^{er} juin 1944, lors de l'opération *Rhubarb*, l'officier James Atkinson, membre d'un escadron de quatre pilotes disparaissait en mer avec son avion, le MB887, après avoir attaqué un train de marchandises en France.

Le Spitfire a été produit en grandes quantités tout au long de la Seconde Guerre mondiale et a subi de nombreuses modifications pour améliorer ses performances (Jackson, 2011). Le Mark VII a été développé spécifiquement pour le vol en haute altitude et seulement 140

exemplaires ont été produits. Ce modèle de Spitfire disposait d'un réservoir de carburant interne dans les ailes pour les montées à haute altitude. Le réservoir est toujours présent sur le fragment d'aile récupéré (**fig. 3**). Un exemplaire complet est exposé au Smithsonian's national Air and Space museum, mais cet avion n'a jamais pris part à des combats actifs et n'a été utilisé que comme avion d'évaluation.

Ainsi, le MB887 possède des valeurs significatives à plusieurs titres;

- valeur historique : représentatif d'un avion emblématique de la Seconde Guerre mondiale, l'objet est un symbole poignant des batailles aériennes meurtrières de l'époque;
- valeur scientifique et technique : l'objet fait partie d'une série de 140 exemplaires seulement et présente une innovation majeure en matière de réservoir de carburant;
- valeur sociale et authenticité : l'objet est directement lié à la mort du jeune pilote australien James Atkinson (des traces d'impact de balles sont visibles sur l'aile) et pourrait constituer un mémorial approprié en son honneur, accompagné d'explications sur le contexte historique;
- valeur esthétique : malgré la détérioration due à sa longue exposition à l'eau de mer, l'objet peut être facilement interprété et sa fonction comprise.

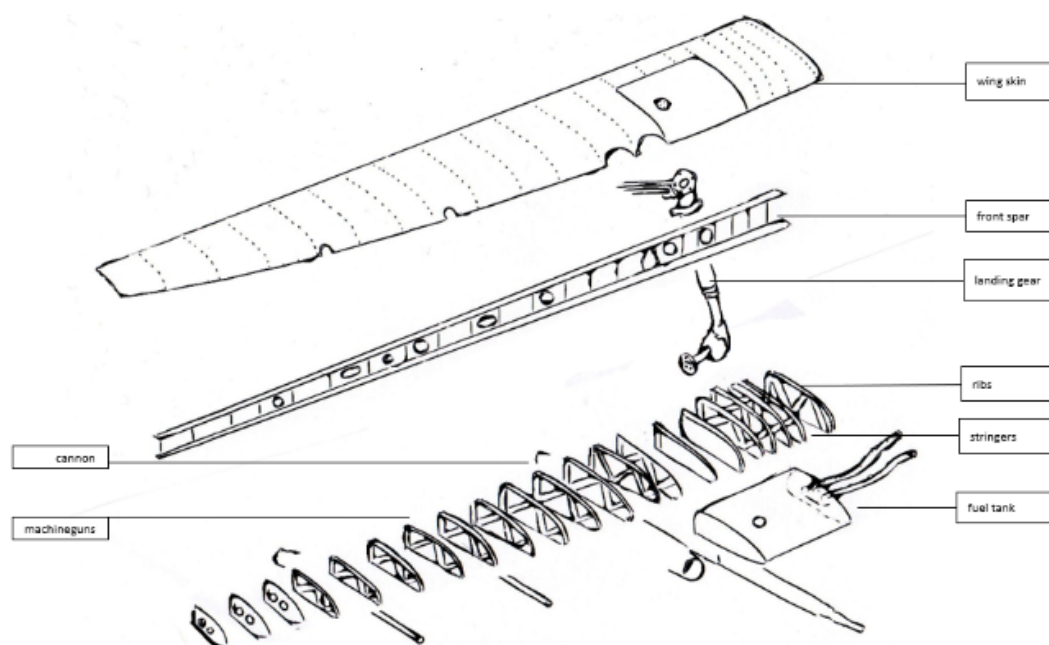


Figure 3 Vue éclatée du fragment d'aile de Spitfire Mk VII. © Eve Paillaux, Arc'Antique.

Examen et diagnostic

L'objet est fabriqué à partir des matériaux suivants : alliages d'aluminium, alliages ferreux, élastomères, matériaux synthétiques, peinture (restes). L'aile est principalement constituée d'un alliage d'aluminium (Al-Cu) très sensible à la corrosion. L'analyse SEM-EDS a déterminé que la plupart des pièces sont en duralumin avec une composition élémentaire d'Al (93,3 %), Cu (4,2 %), Mg (0,9 %), Mn (0,65 %), Si (0,5 %), Fe (0,4 %) et des traces de Ni, Zn, Ti, Cr.

Le fragment d'aile du Spitfire, après 44 ans dans l'océan et 34 ans dans un jardin privé (**fig. 4**), présente diverses détériorations : dégradations mécaniques dues aux combats et au crash (**fig. 5a**), dégradations liées à l'eau de mer (**fig. 5b et c**) et au développement de la végétation

pendant le stockage en extérieur (**fig. 5d**). Une évaluation exhaustive, incluant la dégradation mécanique et chimique, a été entreprise, dont les principales observations sont résumées dans le tableau (**fig. 6**).



Figure 4 Le fragment d'aile de Spitfire Mk VII entreposé dans le jardin. © Arc'Antique.

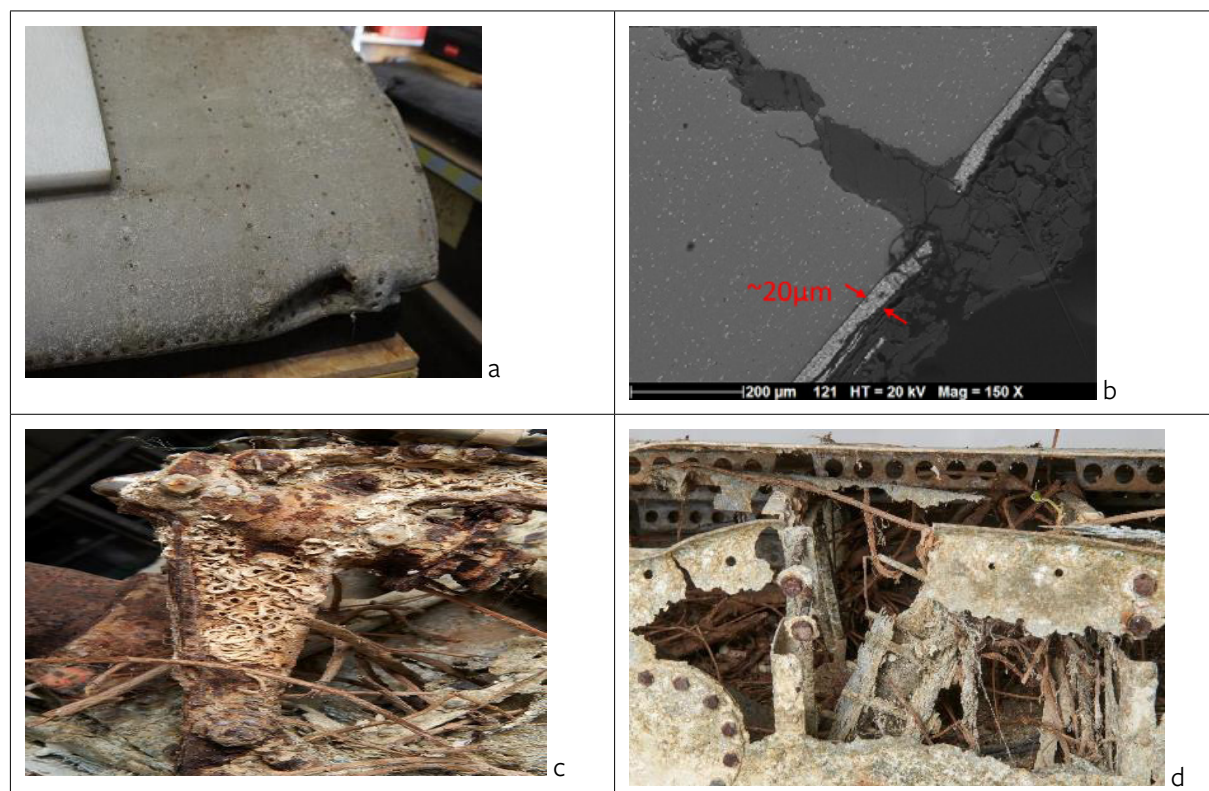


Figure 5 Exemples de dégradations observées sur le fragment d'aile du Spitfire Mk VII : impact de balle (a); photo MEB d'un échantillon en coupe transversale de l'aile montrant une corrosion généralisée, avec corrosion inter et intragranulaire en relation avec des précipités intermétalliques micrométriques (b); développement de micro-organismes marins, appelés « concrétions » (c); présence de sous-bois à l'intérieur de l'aile (d). © Arc'Antique.

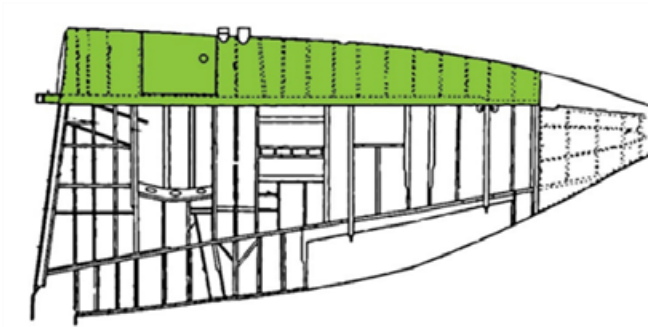
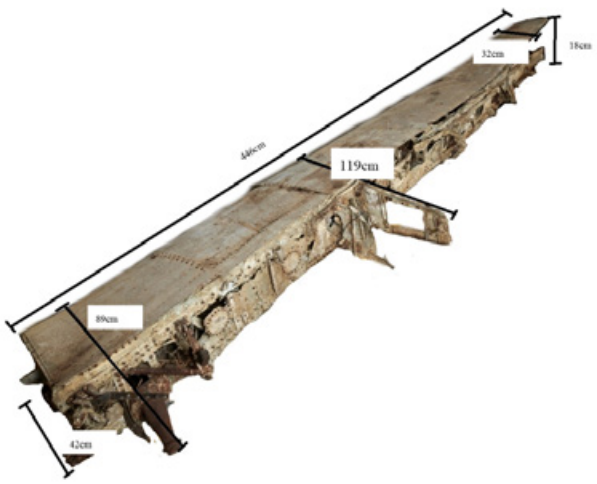
Ce schéma représente une aile complète de Spitfire. En vert, localisation du fragment récupéré.	
Dimensions récupérées: L : 446 cm H: 18 à 42 cm l : 32 à 119 cm	
Principales altérations causées par la corrosion	 Corrosion par piqûration sur la surface en Al Peinture encore présente, écaillée de manière ponctuelle et localisée Produit de corrosion du fer sur la peinture Corrosion galvanique au niveau des anciens rivets Corrosion multiforme profonde Corrosion du fer sous revêtement enduit (craquelé) Corrosion par piqûration Corrosion à l'état d'oxyde
Principales altérations mécaniques	Dépôts adhérents et non adhérents (concrétions marines/restes de végétation). Déformations graves, lacunes, désolidarisation, fissures, ruptures, éléments structuraux manquants, principalement (95 %) sur la structure interne. Déformations légères, lacunes, fissures, taches et éléments structuraux manquants sur la structure de la peau (30 %).

Figure 6 Principaux dommages identifiés sur le fragment d'aile de l'avion Supermarine Spitfire.

© Arc'Antique.

La dégradation mécanique majeure est probablement due au crash (fig. 6). Des impacts de balles sont visibles et ont perforé la structure externe. L'enfouissement marin et le stockage extérieur ont entraîné une importante corrosion. Les altérations varient considérablement entre les parties intérieures et extérieures, avec notamment une dégradation structurelle et une corrosion des nervures et des longerons en interne (fig. 7) et une corrosion localisée et des résidus de peinture d'origine en externe avec une épaisseur moyenne de 20 µm (fig. 5).

On observe des rivets manquants qui ont entraîné une désolidarisation des assemblages. Ces rivets en alliage Al-Cu sont plus riches en Mg que le duralumin et sont plus sensibles à la corrosion. Les boulons en fer ont mieux résisté, mais ont accéléré la dégradation des alliages d'aluminium par un phénomène de corrosion galvanique. Les éléments en fer sont légèrement corrodés et leurs produits de corrosion ont provoqué des taches d'oxydes à la surface de l'aile. Le réservoir et les pièces en élastomère semblent avoir mieux résisté.

Le duralumin est très sensible à la corrosion en présence de chlorures, développant des corrosions localisées, telles que des piqûres, et une corrosion intergranulaire accentuée par la présence de précipités intermétalliques (Vargel, 2004, p. 65, 129, 185) (fig. 5b). Les archives montrent que les pièces en duralumin du Spitfire étaient généralement protégées par un placage en Al (Al pur laminé à chaud sur les deux faces de l'alliage, pour offrir une plus grande résistance à la corrosion) et une peinture (Jackson, 2011). Cependant, l'analyse au MEB-EDS d'échantillons prélevés à différents endroits de l'aile n'a révélé la présence d'un tel revêtement que sur les longerons.

Pendant la période de stockage dans le jardin, le fragment d'aile se trouvait sous une bâche en plastique, entouré de végétation, ce qui générait des conditions humides entraînant une corrosion accrue de l'alliage d'aluminium. La corrosion s'est généralisée dans certaines zones, notamment au niveau de la structure interne, entraînant un feuilletage et une fragilisation structurelle importante. Les alliages d'aluminium sont très sensibles aux variations d'humidité relative, qui produisent des produits de corrosion engendrant des contraintes et une détérioration mécanique accrue.

Les différentes dégradations des surfaces externes sont classées en quatre catégories : corrosion localisée avec piqûres, résidus de peinture d'origine, taches de rouille et rivets manquants (fig. 8). Le revêtement de l'aile est en relativement bon état, mais peut gagner en lisibilité, notamment pour les restes de peinture.

Les piqûres et la corrosion intergranulaire sont fréquents sur les épaves archéologiques en alliage d'aluminium. Dans le cas d'une épave d'avion DC-3 (Tengnér, 2014), cette variabilité des dégradations a aussi été observée : certaines pièces étaient très dégradées, tandis que d'autres semblaient sortir d'usine. Pour les épaves récupérées en mer, les premiers traitements développés se sont inspirés de la stabilisation des matériaux ferreux (Mac Leod, 2014, Degryny, 2014) avec des rinçages chimiques ou électrochimiques pour éliminer les chlorures. Cependant, une étude sur l'efficacité de ces traitements a montré que très peu de chlorures restent présents dans les alliages d'aluminium lorsque l'objet n'est plus en contact avec un environnement chloruré (Tissier, Guilminot, Berges, 2014). En effet, l'absence de composés contenant du chlore et de l'aluminium est probablement due à la grande solubilité de ces composés (Graedel, 1989). L'étape d'extraction des chlorures n'est donc pas jugée nécessaire, mais des traitements de conservation supplémentaires restent indispensables pour assurer la préservation de ce type d'épave en alliage d'aluminium.



Figure 7 Exfoliation du longeron à l'origine de la déformation de la tôle d'aluminium. © Eve Paillaux, Arc'Antique.

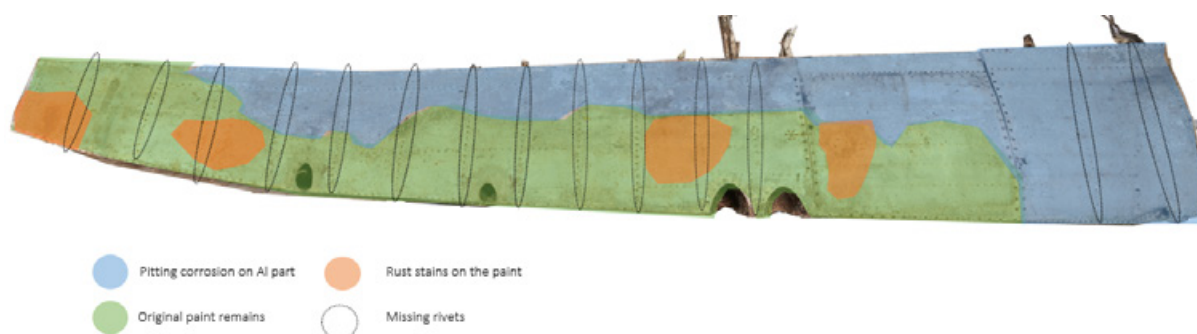


Figure 8 Localisation des différentes dégradations sur le fragment d'aile du Spitfire Mk VII. © Eve Paillaux, Arc'Antique.

En raison de la corrosion du duralumin, les parties de la structure interne sont en très mauvais état, en particulier le longeron et les nervures (**fig. 7**). Le longeron, élément structurel principal, nécessite un traitement de conservation urgent (**fig. 5d**), car il présente une exfoliation importante. Le retrait de certaines nervures (environ 10 %) doit être envisagé au vu de leur état de dégradation. La surface peut gagner en lisibilité pour mieux mettre en valeur les restes de peinture.

Objectifs de conservation

En tenant compte de l'histoire, de l'état de conservation, des résultats du diagnostic et des attentes en matière d'exposition, les objectifs de conservation sont les suivants :

- préservation et consolidation des éléments essentiels pour comprendre les caractéristiques fonctionnelles et techniques;
- élimination des éléments instables ou trop altérés sans intérêt scientifique;
- homogénéisation de l'aspect final de la surface pour la mise en valeur des restes de peinture;
- élimination des dépôts exogènes et des concrétions marines, ainsi que des produits de corrosion de surface, principalement des hydroxydes d'aluminium;
- protection adéquate de la surface pour maintenir sa stabilité lors de l'exposition, malgré les conditions environnementales instables.

Le traitement de conservation-restauration de l'aile du Spitfire a utilisé les résultats des tests de la phase 3 du projet PROCRAFT.

Matériels et méthodes

Analyse SEM-EDS

Elle est réalisée en découpant de petits échantillons de l'objet, en les enrobant dans de la résine époxy, en les polissant successivement avec du papier de SiC avec granulométrie variant de 800 à 4000 puis avec de la pâte diamantée de 3 µm à 1 µm. Pour cette analyse, le microscope électronique à balayage (MEB) JEOL JSM 5800LV est utilisé, avec une tension de 20 kV, et est couplé à la spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDS) pour l'analyse élémentaire. Six zones de 500x500 µm² sont analysées, avec un minimum de 100 000 coups pour chaque spectre.

Préparation du gel d'agar

Il s'agit un agent gélatineux dérivé de polysaccharides d'algue rouge qui est utilisé à 3%p/v. La solution de traitement est chauffée à 50°C, puis la poudre d'Agar Art est ajoutée lentement, le mélange est ensuite chauffé à 90°C et mélangé jusqu'à obtenir une solution homogène et translucide. Après un refroidissement de 24 heures, le gel est chauffé une seconde fois à 90°C. Pour l'application par pulvérisation, le gel est inséré dans le réservoir d'un pistolet de pulvérisation à 70°C, utilisant un modèle de pulvérisateur mural Wagner W450.

Projet PROCRAFT : résultats pour les choix de traitement

Résultats des essais de nettoyage

La variabilité des surfaces de l'aile a nécessité la détermination d'un protocole de traitement spécifique prenant en compte les résultats des tests précédents. La phase 3 du projet a permis d'établir des protocoles de nettoyage sur diverses surfaces métalliques, corrodées et peintes, provenant d'épaves d'avions de la Seconde Guerre mondiale, telles qu'une pale d'hélice, un fragment de raidisseur et une plaque de Messerschmitt Bf109. L'évaluation et la description des couches de corrosion ont précédé l'évaluation de différentes méthodes de nettoyage.

Les tests ont permis de comparer les techniques mécaniques et chimiques de nettoyage, incluant le brossage avec ou sans eau, l'utilisation de scalpels et d'un microtour et le sablage

Traitement mécanique	Impacts sur la surface métallique propre	Impacts sur la surface corrodée	Impacts sur la surface peinte
Scalpel	Inadapté Chronophage pour les grandes surfaces Risque de rayures	Convient aux produits de corrosion locaux	Convient à une utilisation locale
Microtour avec brosse en acier	Inadapté Chronophage pour les grandes surfaces Risque de rayures	Inadapté	Inadapté
Sablage avec un abrasif végétal		Très efficace pour éliminer la corrosion superficielle légère, donne une surface homogène.	
Brosse douce avec de l'eau déminéralisée			Efficace uniquement si la peinture adhère fortement à la surface

Figure 9 Traitements mécaniques et résultats du projet PROCRAFT. © Arc'Antique.

Les traitements chimiques ont consisté en l'application de gels d'agar ou de xanthane, sélectionnés en se basant sur des études antérieures sur les alliages d'aluminium. Toutes les solutions de traitement chimique sont répertoriées ci-dessous (**fig. 10**). Le rinçage a été effectué uniquement après tous les autres traitements, consistant à frotter légèrement avec un coton-tige imbibé d'eau déminéralisée jusqu'à ce qu'aucun résidu ne se dépose plus sur les tampons.

Solution de traitement	pH	Gel	Références	Résultats
Acide citrique (0,055 M)	5,4	Agar	RAF Museum, n.d., Bailey, 2004	Les solutions d'acide citrique ou de citrate tri-ammonium (TAC) éliminent les produits de corrosion, mais 6 à 12 applications de gel pendant dix minutes sont nécessaires pour des surfaces propres et brillantes
Tri-ammonium citrate (TAC) (5%w/v)	7,5	Agar	Morrison, 2007; Giraud, 2021	Le TAC a nettoyé les dépôts en surface, éliminé les produits de corrosion, mais aussi quelques résidus de la couche peinte du Messerschmitt. Efficacité limitée, pas de modification de la peinture.
Acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA) (0,5 M)	8	Agar ou xanthane	MacLeod, 2014; MacLeod, Kelly, 2001	L'EDTA a nettoyé la plupart des dépôts de surface et éliminé les produits de corrosion, la surface était propre après un minimum de 6 applications de gel de dix minutes. La solution d'EDTA est la plus efficace, mais peut légèrement endommager la peinture.
Métasilicate de sodium (2%w/v)	9	Xanthane	MacLeod, Kelly, 2001	Le métasilicate de sodium a eu peu d'effet sur les produits de corrosion, même après 60 minutes de traitement. Sur la surface peinte, le métasilicate de sodium a donné les meilleurs résultats dans la mesure où il a éliminé les dépôts exogènes sans provoquer de décoloration de la surface peinte
Sulfate d'ammonium (0,125 M) + ammoniac (NH ₃) (0,25 M)	9,6	Xanthane	MacLeod, 1983	Le mélange sulfate d'ammonium et ammoniac a bien fonctionné, mais la finition est mate. Le mélange dissout les restes de peinture, il est donc non recommandé pour ces surfaces.
Résine cationique de CTS (120H Cation)	2,9	Seulement avec eau	Carlino, Guilminot, 2020	La résine cationique 120H a également donné d'excellents résultats, cependant son temps de réaction rapide présente des limites et n'est pas adapté aux grandes surfaces

Figure 10 Solutions de traitement testées pour le nettoyage des alliages d'aluminium. © Arc'Antique.

Sur les surfaces corrodées, le sablage avec un abrasif végétal ou l'application d'un gel d'EDTA ont donné les meilleurs résultats tandis que, sur les surfaces peintes, les traitements chimiques étaient plus efficaces, sélectionnés en fonction des composés à éliminer. Lorsque la peinture était fortement adhérente, des techniques mécaniques comme le sablage à l'abrasif végétal ou le brossage à l'eau ont également été efficaces. Les résultats des tests précédents ont été utilisés pour les fragments d'aile du Spitfire Mk VII. Notamment, le TAC en gel est choisi comme solution de traitement pour les parties présentant des résidus de peinture.

Choix du traitement pour le fragment d'aile de Spitfire Mk VII MB887

La première étape a impliqué le nettoyage de la zone interne pour éliminer les sédiments, la terre, le sable, les concrétions et la végétation restants, réalisé principalement par microaspiration. Ce nettoyage initial a considérablement amélioré la lisibilité de l'objet. Ensuite, les parties les plus endommagées de la structure ont été consolidées. Pour les parties très corrodées, une double consolidation a été effectuée, d'abord en profondeur avec du Paraloid B44 à 15 % p/v dans de l'acétone, puis en surface avec du Paraloid B44 à 30 % p/v dans de l'acétone. Le longeron a été renforcé avec de la fibre de verre et du Paraloid B72 à 30 ou 60 % p/v dans de l'acétone. Des remplissages avec du Paraloid B72 (à 60 ou 70 % p/v dans de l'acétone) chargé de microsphères de verre et de pigments ont été nécessaires pour stabiliser les éléments internes et restaurer l'aspect général de l'objet. Les concrétions marines sur les pièces ferreuses ont été retirées mécaniquement, principalement par rotation ou microburin. Sur les pièces structurelles en alliage d'aluminium, le sablage végétal était généralement suffisant, complété par l'élimination des concrétions à l'aide d'une compresse de coton imprégnée d'acide nitrique à 10 % (v/v) (pH=1) pendant 30 secondes suivie d'un rinçage abondant. Pour le nettoyage de la surface de l'aile, qui présentait des résidus de peinture, des produits de corrosion de l'aluminium et des taches de rouille, un premier cycle de nettoyage chimique a été employé avec une solution de TAC à 5 % p/v appliquée par du gel d'Agar à 3 % p/v (**fig. 11**). Comparé à d'autres agents chimiques, le TAC était moins agressif et plus efficace pour éliminer la saleté. Le gel a été pulvérisé à chaud, conformément à un protocole déterminé pour l'application sur de grandes surfaces (Giordano, Cremonesi, 2021). Trois applications de 20 minutes ont été nécessaires pour éliminer la crasse et réduire les taches de rouille (**fig. 12**). Le nettoyage de la peau de l'aile a été suivi d'un sablage à l'abrasif végétal pour homogénéiser la surface.



Figure 11 Utilisation d'un gel d'agar par pulvérisation. Le retrait du gel se présente comme un film.
© Lisa Preud'homme, Arc'Antique.



a



b



c



d



e



f

Figure 12 Nettoyage mécanique avant et après traitement (a et b) et consolidation (c); nettoyage chimique avec du TAC 5 % p/v appliqué avec du gel d'agar à 3% p/v par pulvérisation (d); enlèvement de la surface du gel avant le nettoyage (e); surface après le nettoyage (f). © Arc'Antique.

Après le nettoyage, la protection de la surface est une étape importante pour assurer la préservation à long terme de l'objet. Pour cela, nous avons utilisé la surface sans et avec les résidus de peinture pour conduire les tests de la phase 5 :

- tests de protection en extérieur et en intérieur;
- développement d'une protection innovante à base de cutine (extrait de peau de tomate) très prometteuse;

- tests avec des protections plus classiques : cire, résines (Paraloïd B72, Dinitrol 4010, Lesonal), inhibiteur (carboxylates).

L'efficacité des revêtements a été évaluée par plusieurs moyens, notamment par spectroscopie d'impédance électrochimique, dont les résultats feront l'objet d'une publication spécifique. Les premiers résultats ont cependant montré que les meilleures protections pour l'aile sont la cutine, le Lesonal et le Dinitrol. La cutine est une protection expérimentale mise en œuvre par nos collègues italiens de l'université de Ferrare. Elle utilise les propriétés anti-oxydantes de la cutine contenue dans les peaux de tomate. Celle-ci est utilisée pour produire en deux étapes une résine de poly(ester-uréthane). À l'état de développement, cette résine n'est pas commercialisée. Le Lesonal est très difficile à appliquer. Il est donc actuellement préférable de conseiller le Dinitrol 4010, préférentiellement pour les objets en extérieur ou dans les zones confinées (intérieur des structures).

En fonction du futur projet d'exposition, en intérieur ou en extérieur, nous adapterons le revêtement à appliquer sur les surfaces internes et externes ([fig.13](#)). En complément, nous préconisons les mesures suivantes :

- l'objet doit être monté de manière à renforcer la structure et à permettre une interprétation technique de l'objet;
- la surface intérieure doit être accessible pour permettre un dépoussiérage et un entretien à long terme;
- la sécurité du public doit être assurée et des informations claires doivent être fournies pour l'aider à comprendre l'objet;
- il doit inclure un mémorial en l'honneur du pilote James Atkinson.



Figure 13 Inauguration de l'exposition *Mémoires des airs* aux Archives départementales de Loire Atlantique à Nantes (du 15 avril au 30 juin 2024). © Arc'Antique.

Conclusions

Cet objet illustre le large éventail de questions liées au patrimoine technique et archéologique. Les études historiques et techniques du fragment d'aile mettent en évidence son importance considérable en termes de patrimoine et de valeur historique, émotionnelle, esthétique, scientifique et technique. Le projet de conservation a également permis de développer des techniques de nettoyage innovantes pour les alliages d'aluminium. Des techniques de nettoyage mécanique éprouvées ont été associées à un nettoyage chimique. La prochaine étape de la conservation du fragment d'aile est l'application de la protection sélectionnée à partir des tests effectués dans le cadre du projet PROCRAFT. L'objet sera ensuite exposé localement en Bretagne (France) en souvenir du pilote.

Remerciements

Les auteurs expriment leur sincère gratitude à l'association ABSA 39-45 pour avoir fourni des informations sur l'objet et au DRASSM (département des Recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines) pour son temps. Nous remercions également la direction régionale des Affaires Culturelles (DRAC) Pays de Loire et les JPI-CH pour leur soutien financier. Enfin, nous remercions tout particulièrement Lisa Preud'homme pour ses photos.

Références bibliographiques

- Bailey G.T.** (2004), « Stabilization of a wrecked and corroded aluminium aircraft », dans ICOM-CC (éd.) *Metal 2004, Proceedings of the ICOM-CC Metals Working Group Interim Meeting, 4-8 October, 2004, Canberra, Australia*, ICOM, p. 453-464.
- Bailey G.** (2014), « A critical review of the 1996 conservation treatment of a World War II aircraft carried out at the Australian War Memorial », dans Chemello C., **Collum M., Mardikian P., Sembrat J., Young L.** (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 103-106.
- Carlino M., Guilminot E.** (2020), « Utilisation des résines échangeuses d'ions pour le nettoyage d'objets métalliques archéologiques ou historiques », *CeROArt*, N° 12. Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/ceroart.8014>.
- Carpentier V.** (2022), *Pour une archéologie de la Seconde Guerre mondiale*, Paris, La Découverte, 368 p.
- Degrigny C.** (1995), « Stabilisation de moteurs d'avions immergés », *Studies in conservation*, N° 40, p. 10-18.
- Degrigny C.** (2014), « The conservation of historical marine, terrestrial and industrial aluminium objects : a review », dans Chemello C., **Collum M., Mardikian P., Sembrat J., Young L.** (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 87-95.
- Fournier L.** (2018), « La protection des aéronefs au titre des monuments historiques », *In Situ*, N° 35. Disponible sur : <http://journals.openedition.org/insitu/17047>.
- Giordano A., Cremonesi P.** (2021), « New methods of applying rigid agar gels: from tiny to large-scale surface areas », *Studies in conservation*, N° 66, p. 437-448. Disponible sur : <https://doi.org/10.1080/00393630.2020.1848272>.
- Giraud T., Gomez A., Lemoine S., Pelé-Meziani C., Raimon A., Guilminot E.** (2021), « Use of gels for the cleaning of archaeological metals. Case study of silver-plated copper alloy coins », *Journal of cultural heritage*, N° 52, p. 73-83. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.08.014>.
- Graedel T.E.** (1989), « Corrosion mechanisms for aluminum exposed to the atmosphere », *Journal of electrochemical society*, N° 136, p. 204C-212C.
- Jackson R.** (2011), *Spitfire, la légende*, Ed. Techniques pour l'automobile et l'industrie, 158 p.

Le Maner Y. (dir.) (2008), *Tombés du ciel. Les aviateurs abattus au-dessus du Nord-Pas-de-Calais (1940-1944)*, Saint-Omer, Éditions La Coupole, 179 p.

MacLeod I. (1983), « Stabilization of corroded aluminium », *Studies in Conservation*, N° 28, p. 1-7.

MacLeod I., Kelly D. (2001), « The effects of chloride ions on the corrosion aluminium alloys used in the construction of Australia II », *AICCM Bulletin*, décembre 2001, p. 10-19.

MacLeod I. (2014), « Conservation of aluminum alloys corroded under water: from in-situ conservation through storage to exhibition », dans Chemello, C., Collum, M., Mardikian, P., Sembrat, J., Young, L. (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 39-45.

Morrison R., Bagley-Young A., Burnstock A., Jan van den Berg K., Van Keulen H. (2007), « An investigation of parameters for the use of citrate solutions for surface cleaning unvarnished paintings », *Studies in Conservation* N° 52, p. 255-270. Disponible sur <https://doi.org/10.1179/sic.2007.52.4.255>.

Royal Air Force Museum. « Dornier 17 Media. » Royal Air Force Museum. Disponible sur <https://www.rafmuseum.org.uk/about-us/media-vault/dornier-17-media/> Accessed on 26/07/22.

Tengnér C. (2014), « The preservation of a marine archaeological DC-3 aircraft », dans Chemello, C., Collum, M., Mardikian, P., Sembrat, J., Young, L. (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 97-102.

Tissier Y., Guilminot E., Berges S. (2014), « Characterization of two propeller blades from submerged WWII-era wrecks », dans Chemello, C., Collum, M., Mardikian, P., Sembrat, J., Young, L. (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 79-86.

Vargel C. (2004) *Corrosion of Aluminum*, Oxford, Elsevier, 700 p.

Wreck Diving Liguria. « Archeo-aeronautics. » Wreck Diving Liguria. Disponible sur <http://www.wreckdivingliguria.com/newsite/archeo-aeronautics.html> (accessed on 26/07/22)

Les auteurs

Eve Paillaux Conservatrice-restauratrice au Centre de restauration et d'études archéologique municipal (CREAM), Vienne (38), France, epaillaux@mairie-vienne.fr

Sotiris Bampitzaris Étudiant en conservation-restauration, université d'Athènes.

Jane Echinard Cheffe de service, GPLA-Arc'Antique, département de Loire-Atlantique, arc.antique@loire-atlantique.fr

Cesar Escobar-Claros Ingénieur matériaux au Centro tecnológico de componentes CTC, Santander, ingcesarescobar@gmail.com

Magali Brunet CEMES-CNRS, université de Toulouse, France, magali.brunet@cemes.fr

Gilles Baron Responsable du secteur patrimoine sous-marin, GPLA-Arc'Antique, département de Loire-Atlantique, arc.antique@loire-atlantique.fr

Luc Robbiola TRACES UT2J, université de Toulouse, CNRS, France, robbiola@univ-tlse2.fr

Élodie Guilminot GPLA-Arc'Antique, département de Loire-Atlantique, Elodie.GUILMINOT@loire-atlantique.fr