

La peste du zinc en milieu patrimonial

Caractérisation des alliages de zinc et étude de cas au Musée National de l'Automobile de Mulhouse

Mémoire présenté par :

Lionel Riva

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation
Objets scientifiques, techniques et horlogers

Année académique 2021-2022

Remise du travail : 18.07.2022

Jury : 23.08.2022

Nombre de pages : 45

Engagement

« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets. »

Date et signature :

Bottens, le 18.07.2022

Lionel Riva

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Brice Chalançon qui fut mon maître de stage au Musée National de l'Automobile de Mulhouse ainsi que tous ses collaborateurs avec qui j'ai passé des moments enrichissants.

Je remercie également Christian Degrigny pour l'enseignement de l'analyse par voie électrochimique avec DiscoveryMat ainsi que pour les mesures FRX et son expertise.

Merci aussi à Valentin Boissonnas, référent de bon conseil pour ce travail ainsi que Régis Bertholon, Tobias Schenkel et Thierry Jacot qui ont accompagné la phase préparatoire.

Et finalement, merci à Elodie Granget et Laura Brambilla pour m'avoir encouragé à choisir ce sujet, le secrétariat de la HE-Arc CR pour l'élaboration de la convention de stage ainsi que toutes les autres personnes qui m'ont donné des exemplaires de modèles réduits atteints de la peste du zinc et celles que j'ai rencontré dans les garages lausannois pour discuter du sujet.

Table des matières

Introduction	4
1. État de l'art	5
1.1 Histoire du zinc.....	5
1.2 Du minerai à la fonderie industrielle.....	7
1.3 Les zamaks	8
1.4 Le moulage sous pression	12
1.5 La corrosion des alliages de zinc.....	13
1.6 Le Musée National de l'Automobile de Mulhouse.....	17
1.6.1 Histoire	17
1.6.2 Collections concernées.....	18
2. Méthodologie	19
2.1 Rappel des objectifs.....	19
2.2 Sélection du corpus	19
2.2.1 Critères de sélection	19
2.2.2 Objets patrimoniaux	20
2.2.3 Autres objets.....	22
2.3 Outils d'analyse	23
2.3.1 Fluorescence des rayons X (FRX).....	23
2.3.2 DiscoveryMat.....	24
2.3.3 MiCorr.....	26
2.4 Conservation préventive.....	26
3. Analyses	27
3.1 Analyses FRX.....	27
3.1.1 Résultats.....	27
3.1.2 Synthèse des résultats	29
3.2 Analyses DiscoveryMat.....	31
4. Discussion des résultats	36
4.1 Composition des alliages de zinc : théorie et réalité	36
4.2 DiscoveryMat pour identifier les alliages de zinc.....	38
Conclusion	39
Bibliographie	40
Liste des illustrations et tableaux	42
Lexique	43

Résumé

Ce travail fut réalisé comme projet de fin de diplôme dans le cadre de la formation bachelor en conservation préventive à la HE-Arc de Neuchâtel. Il s'inscrit dans la thématique de l'étude des altérations des alliages de zinc en milieu patrimonial abordée en 2017 par l'équipe de recherche et développement de l'école dont l'initiative fut soutenue par le Musée National de l'Automobile de Mulhouse avec qui d'autres collaborations ont été menées par le passé. L'objectif de cette étude est de caractériser la composition et le comportement dans le temps d'un corpus d'objets en alliages de zinc présentant pour certains des altérations de la peste du zinc. Il s'agit pour l'essentiel de pièces ornementales et techniques de véhicules des années 1900 à 1950 comparées avec des objets plus récents de même nature comme des modèles réduits de voitures et des échantillons de zinc pur et de zamak, soit un alliage Zn-Al-Cu-Mg. Les objets ont été analysés par fluorescence des rayons X pour connaître leur composition, ce qui a permis de tester ce type d'alliages pour la première fois avec l'outil DiscoveryMat qui s'était déjà avéré performant avec le cuivre et l'aluminium. Il s'agit d'un outil en libre-accès d'identification par voie électrochimique de métaux et alliages patrimoniaux développé par l'école. Au total, la composition de trente objets a pu être déterminée dont neuf types d'alliages caractéristiques ont été mesurés avec succès pour constituer les premières entrées relatives au zinc et à ses alliages dans la base de données qui rend DiscoveryMat exploitable en contexte patrimonial.

Abstract

This work was carried out as an end-of-degree project in the framework of the bachelor's degree course in preventive conservation at the HE-Arc of Neuchâtel. It is part of the study of the alterations of zinc alloys in heritage environments, which was undertaken in 2017 by the school's research and development team, whose initiative was supported by the Musée National de l'Automobile de Mulhouse, with which other collaborations have been carried out in the past. The objective of this study is to characterise the composition and behaviour over time of a corpus of zinc alloy objects, some of which show signs of zinc plague. These are mainly ornamental and technical parts of vehicles from the 1900s to 1950s, compared with more recent objects of the same nature, such as model cars and samples of pure zinc and zamak, a Zn-Al-Cu-Mg alloy. The objects were analysed by X-ray fluorescence to determine their composition, which made it possible to test this type of alloy for the first time with the DiscoveryMat tool, which had already proved to be successful with copper and aluminium. This is an open access tool for the electrochemical identification of heritage metals and alloys developed by the school. In total, the composition of thirty objects was determined, of which nine characteristic alloy types were successfully measured to constitute the first entries relating to zinc and its alloys in the database that makes DiscoveryMat usable in a heritage context.

Introduction

Un jour en discutant avec Christian Degrigny, membre de l'équipe de recherche et développement de la filière HE-Arc conservation-restauration (CR), je manifestais mon intérêt pour le patrimoine automobile dans lequel je m'investis à titre privé depuis une dizaine d'années. Il m'orienta alors vers le Musée National de l'automobile de Mulhouse qui avait constaté des altérations particulières sur des pièces en alliages de zinc provoquant des craquelures et des déformations. J'ai alors proposé à Brice Chalaçon, responsable de l'atelier de restauration du musée, d'étudier le sujet et d'analyser des matériaux pour tenter de comprendre le phénomène connu sous le nom de peste du zinc.

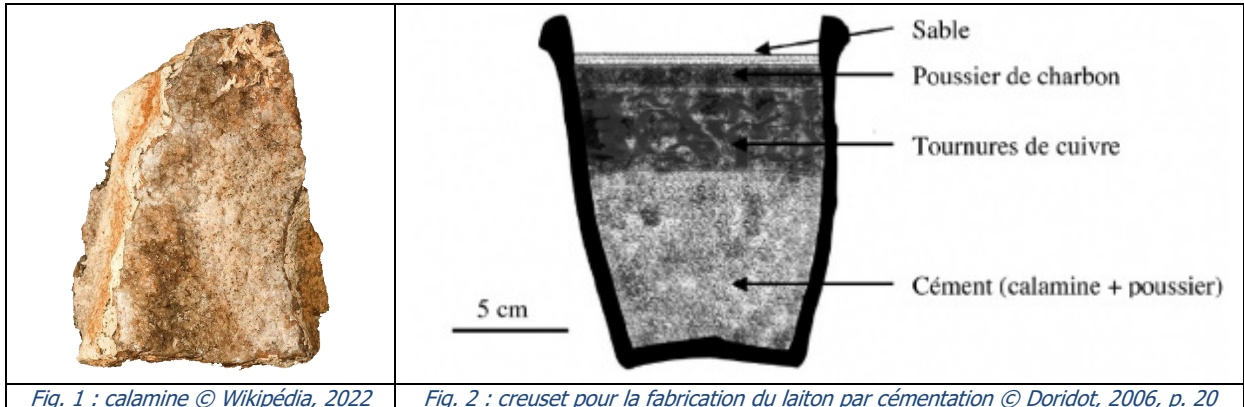
La collaboration entre l'institution et l'école pour l'étude de la corrosion d'alliages spécifiques n'est pas nouvelle. En 2020, un projet de recherche sur la corrosion de pièces de circuits de refroidissement en alliage d'aluminium fut mené par Elodie Granget dans le cadre de l'obtention du master en conservation-restauration d'objets techniques, scientifiques et horlogers. La composition des alliages fut déterminée par la fluorescence des rayons X, soit une technique d'analyse élémentaire dont la plupart des musées n'a pas accès. Ces données ont permis d'associer des alliages particuliers à des tracés relatifs à leur comportement électrochimique grâce à DiscoveryMat. Il s'agit d'un outil en libre-accès développé par l'école dont le matériel et la technique sont plus abordables mais pour être performant, il requiert une base de données pour que lorsqu'on effectue une mesure, on puisse établir une correspondance avec un alliage dont la composition fut précédemment déterminée. Les données recueillies dans ce travail facilitent aujourd'hui au musée l'identification des alliages d'aluminium pour prendre des mesures de conservation préventive et curative sur des véhicules de haute importance pour la collection, c'est pourquoi il manifeste toujours son intérêt pour le développement de la base de données. En réponse à cela, nous proposons dans cette étude de caractériser les alliages de zinc qui constituent les différentes typologies d'objets du musée, ce qui permet de créer les premières entrées relatives aux alliages de zinc sur DiscoveryMat. Cela permet par la même occasion de mieux comprendre pourquoi et comment se développe la peste du zinc. Ces données seront par la suite mises à disposition sur MiCorr, un outil d'aide au diagnostic des altérations des métaux patrimoniaux en libre-accès, également développé par la HE-Arc.

Cette étude s'articulera en trois étapes : la première prendra la forme d'un stage au musée pour collecter un corpus d'objets présentant ou non la peste du zinc. Dans un second temps, on étudiera leur composition afin d'évaluer l'éventuel effet de certains éléments d'addition sur les altérations observées. En dernier lieu, on testera l'outil DiscoveryMat afin de juger de son aptitude à déterminer les différents alliages de zinc, voire de distinguer ceux sensibles à la peste du zinc.

1. État de l'art

1.1 Histoire du zinc

L'histoire du zinc est étroitement liée à celle du cuivre car on le trouve parfois dans des proportions allant jusqu'à 6% dans des objets cuivreux d'avant notre ère¹. Cette présence anecdotique témoigne d'un usage vraisemblablement involontaire de ce métal par les fondeurs de l'Âge du Bronze en Europe. Dès le XIII^{ème} siècle de notre ère, les objets s'apparentant à des laitons, soit des alliages de cuivre, de zinc et parfois d'étain, deviennent plus courants². Les premières sources écrites décrivant le durcissement des cuivres par la calamine (*fig. 1*), un mélange carbonates ($ZnCO_3$) et de silicates de zinc (Zn_2SiO_4), proviennent de l'Antiquité, avec des mentions par Pline d'Ancien dans *Histoire Naturelle* puis dans l'Ancien Testament³. Le processus appliqué dit de cémentation (*fig. 2*) fut décrit seulement au Moyen Âge par Théophile le Moine (~1070-1125)⁴. L'archéologie expérimentale⁵ et l'analyse de creusets de l'époque romaine⁶ ont permis d'affirmer que cette technique consistait à diffuser dans le cuivre et grâce à la combustion du charbon (CO_2), le zinc gazeux provenant des oxydes de la calamine. Pour ceci, la température est portée à environ 950°C pendant deux heures, soit en dessous du point de fusion du cuivre (1083°C) et au-dessus du point d'ébullition du zinc (907°C). Pour terminer la formation du laiton, l'ensemble doit dans un second temps être porté au-delà de 1050°C pour que l'alliage fonde et s'agglomère⁷.



Si cela témoigne d'une maîtrise assurée de la fabrication de laiton, le zinc n'était pas pour autant connu sous sa forme métallique. Ainsi, aucun objet antique en zinc ne nous est parvenu. Il est

¹ Tabariès de Grandsaignes, 1907, p. 71

² Russel et Lee, 2005, p. 337

³ Habashi, 2002, p. 1

⁴ Doridot *et al.*, 2006, p. 16

⁵ *Ibid.*, 2006

⁶ Rabeisen *et al.*, 2010, p. 351

⁷ Doridot *et al.*, 2006, p. 20

toutefois probable que nos ancêtres aient observé de faibles quantités de zinc agglomérées sur les parois des cheminées de leurs fours car au-delà de 1000°C, il se trouve sous forme gazeuse. Cette hypothèse est sans doute plus vraie pour les indiens et les chinois du XIV^{ème} siècle de notre ère qui furent les premiers à produire du zinc en condensant ses vapeurs dans un milieu dépourvu d'air. Il en sera d'ailleurs rapidement fait commerce avec le monde occidental⁸ qui le voyait comme un métal précieux car ayant l'apparence de l'étain et des propriétés similaires, il a une excellente résistance à la corrosion.

En Europe à la moitié XVIII^{ème} siècle, alors que les fondeurs savent modifier les propriétés du laiton en augmentant la quantité de calamine utilisée dans les fonderies de cuivre, on parvient finalement à produire du zinc. Par la suite, le développement industriel de l'extraction du zinc permettant de disposer abondamment de ce nouvel élément métallique va transformer la production des laitons. Il est désormais possible de mieux contrôler les proportions des éléments de l'alliage et la méthode par cémentation peut être remplacée par la fusion directe du zinc dans le cuivre liquide.

Au début du XIX^{ème} siècle, on ajout du nickel aux laitons pour former un nouvel alliage qui vient concurrencer l'argent : il est plus résistant à la corrosion, plus dur, plus facile usiner, à souder et surtout meilleur marché. On le connaissait sous les noms de *Neu-Silber*, *German-Silver* ou encore *Nickel-Silver* mais le nom retenu aujourd'hui est *Maillechort*, de l'acronyme des métallurgistes français Maillot est Chorier ayant déposé le brevet vers 1820. Il ne doit pas être confondu avec le *Melchior* (Cu-Ni). Par la suite, la production du laiton continuera de croître pour les besoins industriels de la guerre, dont entre autres les cartouches de munition. Le zinc trouve également une application dans les piles voltaïques qui sont constituées d'un empilement de disques de zinc et de cuivre.

Les applications du zinc seul demeurent toutefois limitées car l'un de son inconvénient est d'avoir une faible résistance à la fatigue⁹. En d'autres termes, il se casse facilement sous contrainte mécanique ou en conséquence de son fluage¹⁰ naturel au fil du temps, ce qui est problématique pour les sculptures en zinc. Il est tout de même couramment employé pour les revêtements de toits et les conduites d'eau au XIX^{ème} siècle¹¹ (*fig. 3, p. 9*). Aujourd'hui, les toitures réalisées en zinc laminé contiennent de petites proportions de titane (0,06-0,20%) et de cuivre (0,08-1,00%)¹², ce qui leur confère une meilleure résistance à la fatigue et à la corrosion dans des conditions climatiques extrêmes tout en favorisant des mises en forme complexes pour l'architecture moderne¹³ (*fig. 4, p. 9*).

⁸ Schönnenbeck et Neumann, 2004, p. 43

⁹ Lexique, p. 45

¹⁰ Lexique, p. 45

¹¹ Colombié, 2008, p. 582

¹² Valeurs appliquées par l'entreprise suisse VMZINC

¹³ Propriétés des alliages zinc-titane selon l'entreprise suisse Rheinzink

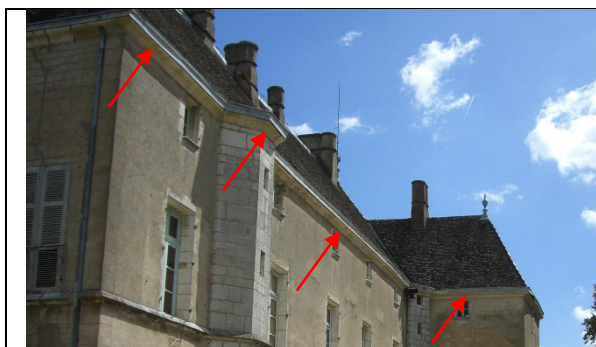


Fig. 3 : gouttière de toit du château de Germolle (XIX-XX^{ème} siècle) © Christian Degrigny, 2022



Fig. 4 : toiture en alliage Zn-Ti © rheinzink.ch

La bonne résistance à la corrosion du zinc en fait également un revêtement de protection efficace, par exemple sur le fer. Pour ceci, il existe plusieurs procédés dont la galvanisation qui s'opère par immersion dans du zinc liquide et le zingage par électrolyse¹⁴.

Au XIX^{ème} siècle commence l'ère des alliages légers et l'on sait que très vite, l'association du zinc avec l'aluminium fut expérimentée. Il est cependant difficile de trouver aujourd'hui des objets témoins du balbutiement de ces alliages binaires car ils ont tous été écartés, faute de stabilité. On parle d'alliages obsolètes¹⁵.

1.2 Du minerai à la fonderie industrielle

Un premier brevet pour l'extraction du zinc de la calamine est déposé en 1738 par l'ingénieur britannique William Champion¹⁶, s'inspirant des hauts-fourneaux chinois. Le procédé, très énergivore, est toutefois rapidement dépassé. S'en suivra un demi-siècle d'innovations : on teste différents types de fours et d'autres minerais de zinc que la calamine que l'on trouve en Europe (Angleterre, Belgique, Allemagne, Silésie, Hongrie, Autriche, Espagne) et aux États-Unis¹⁷. Le minerai le plus exploité est la blende du zinc car elle contient beaucoup de sulfures (ZnS). Il existe également des minerais de zinc oxydé comme la zincite (ZnO) ou la franklinite (ZnFe₂O₄)¹⁸.

Pour fondre du zinc, la température du minerai doit être élevée dans un four à des valeurs très élevées afin d'extraire les oxydes de zinc sous la forme de poudre blanche, appelée blanc de zinc, que l'on utilise aussi à des fins pharmaceutiques ou dans les peintures. C'est ce que l'on appelle le grillage. Cependant, cette étape extrait également les autres oxydes métalliques contenus dans le minerai, essentiellement du plomb mais aussi des traces d'autres éléments comme Sn, Cd, Sb ou Bi. Le mélange d'oxydes obtenu est ensuite réduit grâce au monoxyde de carbone via du charbon ou du

¹⁴ Colombié, 2008, pp. 582-606

¹⁵ I. Polmear, 2006, p. 227

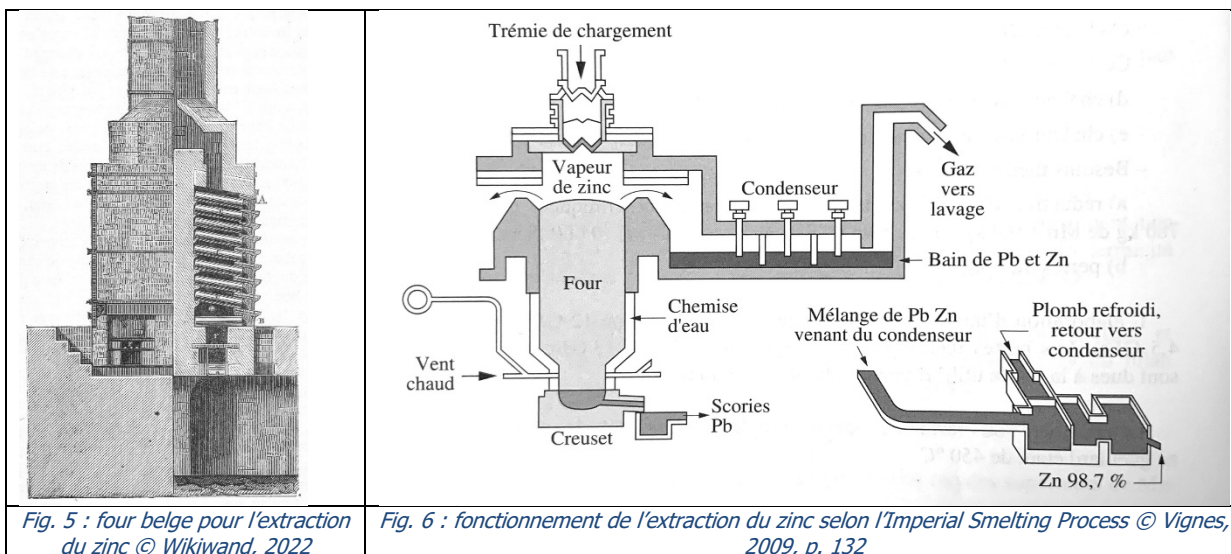
¹⁶ Schönnenbeck et Neumann, 2004, p. 43

¹⁷ Circular Bureau of Standards, 1931

¹⁸ A. Cornet et F. Hlawka, 2006, p. 43

coke pour obtenir un mélange de zinc et de plomb qu'il reste à isoler par distillation. Le processus consiste à séparer des composants en milieu liquide grâce à des points d'ébullition suffisamment éloignés¹⁹. Pour séparer le zinc du plomb au XIX^{ème} siècle, plusieurs méthodes sensiblement différentes existent selon les régions où l'on exploite les gisements plombo-zincifères. Au tournant du siècle, les fonderies belges qui exploitent un minerai plutôt pauvre développent un four (fig. 5) plus efficace en ajoutant des condenseurs en céramique dans les creusets pour récupérer le plomb. L'amélioration de l'extraction du zinc continuera pour les besoins des deux guerres mondiales puis de la reconstruction dans les années 1950, période depuis laquelle la technique n'a plus véritablement changé. Elle se nomme *Imperial Smelting Process* et l'ensemble est composé d'un « *haut-fourneau [et] d'une unité de séparation par liquidation* »²⁰ (fig. 6).

Ce zinc de fonderie peut être laminé ou employé comme revêtement de surface. Cependant, les impuretés provenant du minerai vont demeurer problématiques pour les alliages de zinc jusqu'à ce que l'on puisse les diminuer suffisamment par voie électrolytique²¹. Cette technique développée entre la Belgique, les États-Unis et le Royaume-Uni dans les années 1920 permet de proposer un zinc suffisamment pur et encore inégalé aujourd'hui. Dès lors, on trouve les premiers tableaux de normes pour le zinc en fonction des différents degrés de pureté et les applications possibles, dont son alliage stable avec l'aluminium.



1.3 Les zamaks

L'alliage du zinc et de l'aluminium se développe au début du XX^{ème} siècle alors que l'industrie poursuit sa course au rendement. Tous les moyens sont bons pour baisser le coût des matières premières et

¹⁹ Vignes, 2009, p. 27

²⁰ Vignes, 2009, p. 132

²¹ Lexique, p. 45

augmenter la vitesse de production²². Cet alliage binaire est prometteur car il allie légèreté, une certaine dureté, se coule facilement et en théorie, il devrait avoir une excellente résistance à la corrosion. Il permet un niveau de précision tel que l'on peut couler des pièces avec des parois très fines, même des filetages, ce qui gomme quasiment toute nécessité d'usinage pour un produit fini, bien qu'il s'y prête bien²³. Malgré tout, les débuts de ces alliages binaires sont catastrophiques et les objets produits s'altèrent après quelques semaines²⁴. Leur instabilité résulte des traces de plomb, d'étain, de cadmium et de fer. Ces éléments très peu solubles dans le zinc se disposent de manière éparse aux joints des grains et peuvent provoquer une corrosion inter cristalline²⁵, ou intergranulaire selon les sources²⁶. En effet, il se produit un effet de corrosion galvanique de ses impuretés par le zinc qui est accélérée en milieu humide²⁷. Ces éléments auront tendance à développer ce phénomène dans des zones contenant des microfissures causées lors de la coulée ou ultérieurement par la fatigue du matériau. Si les différents paramètres de coulée comme la vitesse et la pression ne sont adaptés au volume et au niveau de détail de la pièce, une porosité plus forte en surface ou proche des angles peut également favoriser ce problème²⁸. D'après Robert M. Curts, l'étain a la particularité de provoquer des déformations sur les alliages Zn-Al (*fig. 7, p. 12*). Un échange avec Jérôme Pétin, membre de l'association *expérience-zamak* et chargé d'enseignement à l'École Supérieure de Fonderie et de Forge à Sièges nous renseigne également sur la présence d'impuretés de fer et de silicium inhérentes à l'aluminium que l'on apporte à l'alliage. L'élément Si n'est en revanche pas responsable de cette forme de corrosion.

En 1926, la New Jersey Zinc Company qui développe depuis quelques années un procédé électrolytique pour raffiner le zinc parvient à obtenir un métal suffisamment pur (99,995%) pour proposer une version stable de cet alliage aux propriétés révolutionnaires : le *zamak*. Il s'agit de l'acronyme de zinc, aluminium, magnésium et cuivre (en allemand : Kupfer). Du côté anglais, on y parvient également à la même période et l'on attribue l'appellation *mazak* qui sera pourtant vite oubliée au profit du développement de différentes gammes de zamak dans la continuité du brevet américain. Il ne s'agit toutefois pas d'un alliage quaternaire à proprement parler car Cu et Mg sont ajoutés dans de très faibles proportions. Le cuivre favorise la dureté et la résistance à l'usure de l'alliage mais augmentera la variation dimensionnelle des pièces, ce qui peut être problématique lorsque la précision est de mise. Il réduit aussi considérablement sa ductilité²⁹, c'est pourquoi il existe

²² Bally, 1937, p. 975

²³ Colombié, 2008, p. 619

²⁴ Russel et Lee, 2005, p. 343

²⁵ Colombié, 2008, p. 617

²⁶ Cornet et Hlawka, 2006, p. 111

²⁷ Russel et Lee, 2005, p. 343

²⁸ *Ibid.*, p. 344

²⁹ Dour, 2009, p. 324 ; lexique, p. 45

des zamaks qui n'en contiennent pas ou très peu. Le magnésium augmente aussi légèrement la dureté mais son rôle essentiel est l'amélioration de la formation des grains, dite germination, qui empêche par la même occasion la corrosion intergranulaire lorsque la fraction d'impuretés correspond aux normes³⁰. L'aluminium est le principal élément d'addition qui caractérise les zamaks dont la quantité idéale est celle de l'hypoeutectique³¹ (fig. 8) comprise en 3 et 4,5 % le tout porté à 381°C. Certaines fonderies préconisent plutôt 3,5 et 4,3 % pour une qualité optimale³².

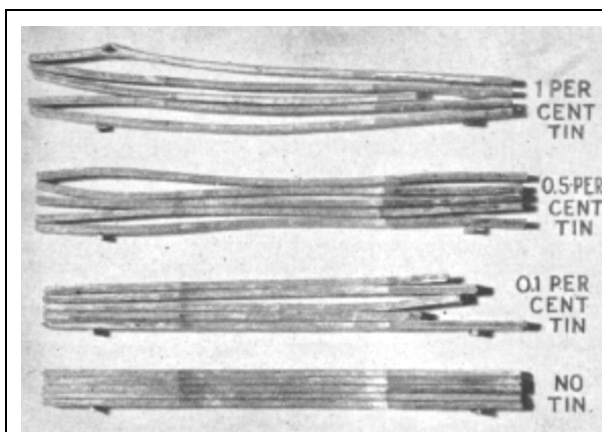


Fig. 7 : expérience démontrant les effets de l'étain sur des barres d'alliages de zinc après 60 jours (HR. 100%, T. 70°C)
© Curts, 1930, p. 616

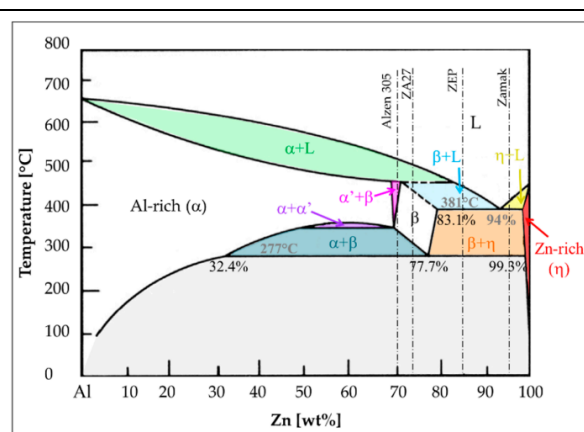


Fig. 8 : diagramme de phase Zn-Al © Pola, 2020, p. 3

Pour la grande majorité des alliages de zinc³³, on retient les zamaks de type 2, 3 et 5 (tableau 1, p.13) que l'on coule sous pression et plus rarement, les zamaks de type 8, 12 et 27 (tableau 1, p.13) qui sont plus adaptés à d'autres types de coulée (par gravité, au sable, en coquille ou sous-pression en chambre froide³⁴) et des applications spécifiques (meilleure esthétique et résistance mécanique³⁵). D'autres zamaks plutôt anecdotiques auraient vraisemblablement des propriétés intermédiaires. Il existe cependant des alliages contenant plus d'aluminium nommés kayem pour des usages particuliers en petite série : prototypes, moules pour injection de thermoplastiques et outils industriels de découpe ou d'emboutissage³⁶. A l'inverse, les alliages à faible teneur en aluminium (<0,01%), dits ilzro (tableau 1 : ~ZP16), résisteront mieux aux hautes températures³⁷.

³⁰ Pétin, 2022

³¹ Lexique, p. 45

³² Colombié, 2008, p. 611

³³ 95% aujourd'hui selon le site web *experience-zamak.com*, la référence des fonderies françaises de zinc.

³⁴ Les alliages de zinc de A à Z, p. 33

³⁵ *Ibid.*, p. 33

³⁶ Colombié, 2008, p. 610 ; lexique, p. 45

³⁷ *Ibid.*, 2008, p. 610

Les alliages susmentionnés correspondent à la norme française Afnor NF EN 1774 parue en octobre 1997 remplaçant une version précédente de 1990, et ainsi de suite. C'est la raison pour laquelle la désignation et les proportions des métaux constitutifs peuvent varier selon la date des ouvrages tels que les manuels d'ingénierie et de sciences de matériaux. Une constante demeure : la désignation de normalisation ZL correspond aux zamaks de fonderie et ZP, aux pièces moulées dont les proportions d'impuretés peuvent être sensiblement supérieures (exemple : Pb 0,003% pour ZL et 0,005% pour ZP).

Tableau 1 : Désignation et composition chimique en pourcentage des pièces moulées en alliages de zinc normalisés

© Colombié, 2008, p. 609

Désignation numérique	Désignation abrégée	Élément	Al	Cu	Mg	Cr	Ti	Pb	Cd	Sn	Fe	Ni	Si	Zn
ZP0400	ZP3	min. max.	3,7 4,3	– 0,1	0,025 0,06	– –	– –	– 0,005	– 0,005	– 0,002	– 0,05	– 0,02	– 0,03	le solde
ZP0410	ZP5	min. max.	3,7 4,3	0,7 1,2	0,025 0,06	– –	– –	– 0,005	– 0,005	– 0,002	– 0,05	– 0,02	– 0,03	le solde
ZP0430	ZP2	min. max.	3,7 4,3	2,7 3,3	0,025 0,06	– –	– –	– 0,005	– 0,005	– 0,002	– 0,05	– 0,02	– 0,03	le solde
ZP0610	ZP6	min. max.	5,4 6,0	1,1 1,7	– 0,005	– –	– –	– 0,005	– 0,005	– 0,002	– 0,05	– 0,02	– 0,03	le solde
ZP0810	ZP8	min. max.	8,0 8,8	0,8 1,3	0,015 0,03	– –	– –	– 0,006	– 0,006	– 0,003	– 0,06	– 0,02	– 0,045	le solde
ZP1110	ZP12	min. max.	10,5 11,5	0,5 1,2	0,015 0,03	– –	– –	– 0,006	– 0,006	– 0,003	– 0,07	– 0,02	– 0,06	le solde
ZP2720	ZP27	min. max.	25,0 28,0	2,0 2,5	0,01 0,02	– –	– –	– 0,006	– 0,006	– 0,003	– 0,1	– 0,02	– 0,08	le solde
ZP0010	ZP16	min. max.	0,01 0,04	1,0 1,5	– 0,02	0,1 0,2	0,15 0,25	– 0,005	– 0,005	– 0,004	– 0,05	– –	– 0,05	le solde

En résumé, les zamaks ainsi que leurs variantes permettent de produire de grandes quantités de pièces grâce à la coulée sous pression qui ne nécessite pas ou peu d'interventions ultérieures, ni de revêtement, et sa matière première est bon marché. Il a une faible variation dimensionnelle, est assez dur et sa tenue à long terme est assurée. Son champ d'application en métallurgie est considérable et la croissance de sa demande le fut tout autant jusqu'à la fin du XX^{ème} siècle où les plastiques prirent une forte part de marché, car moins chers et plus légers. La figure 9 de la page suivante est un exemple du remplacement de pièces en alliage de zinc par des polymères de synthèse illustrant un carburateur³⁸ *Dell'Orto* monté sur un scooter *Lambretta Luna* de 1969 et son modèle de remplacement produit aujourd'hui. Les parties inférieure et supérieure sont désormais produites en plastique car elles ne contiennent pas de parties filetées nécessitant la dureté du zamak. D'après *experience-zamak.com*³⁹, cette tendance s'inverse car contrairement aux matériaux plastiques dont la popularité baisse en raison de la crise climatique que nous traversons, le zamak demeure plus beaucoup durable et se recycle entièrement. Les nouveaux bouchons de parfum *Dior* l'illustrent bien (*fig. 10, p. 14*).

³⁸ Lexique, p. 45

³⁹ Plateforme française en ligne très active dans l'innovation des alliages Zn-Al

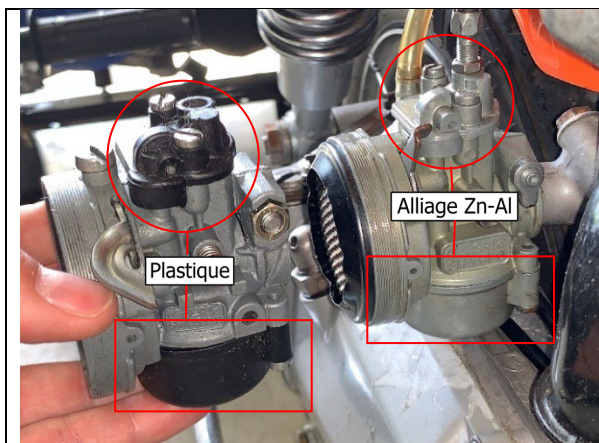


Fig. 9 : évolution des matériaux d'un carburateur Dell'Orto ©
Lionel Riva, HE-Arc, 2022



Fig. 10 : collier des flacons de parfums Dior en zamak avec
revêtement de surface © experience-zamak.fr

1.4 Le moulage sous pression

La caractéristique particulière de ce procédé également dit par injection ou coulée sous pression, contrairement aux autres techniques de coulée de métaux est que le moule est comblé entièrement avant que le métal ne commence à se solidifier⁴⁰. Cela est possible uniquement avec des alliages ayant un point de fusion bas et grâce au zinc, les zamaks en sont le parfait exemple ($\sim 400^{\circ}\text{C}$). L'avantage est de pouvoir créer des pièces fines, précises et solides du fait de l'homogénéité de l'alliage à la solidification⁴¹. Lors de l'opération qui s'effectue très vite, de l'ordre du millième au dixième de seconde selon la taille de pièce⁴², le métal est pulvérisé sous une pression pouvant atteindre 100 à 300 bars⁴³ ce qui implique divers effets indésirables dont une forte porosité. Les bulles d'air sont alors expulsées dans un second temps par « *une pression d'intensification très élevée [allant] de 500 à 1200 bars* »⁴⁴.

L'invention du procédé de moulage sous pression pour métaux et alliages, dit *die-cast* en anglais est difficile à dater mais le plus ancien article relatif à l'usage des alliages Zn-Al dans le milieu automobile consulté pour cette étude témoigne qu'il fut employé dès les débuts de ces alliages⁴⁵ (fig. 11 et 12, p. 15). L'encyclopédie en ligne *Britannica* évoque l'invention du procédé dans la seconde moitié du XIX^{ème} pour la fabrication de caractères d'imprimerie. La fonderie sous pression des alliages Zn-Al, de ses débuts à aujourd'hui, s'applique à de nombreux domaines autres que l'automobile et le modélisme. On retrouve des pièces en horlogerie, en bijouterie, sur les installations électriques et sanitaires du bâtiment mais aussi de l'outil au simple objet décoratif. En somme dans tous les

⁴⁰ Dour, 2009, p. 55

⁴¹ Les alliages de zinc de A à Z, 2009, p. 107

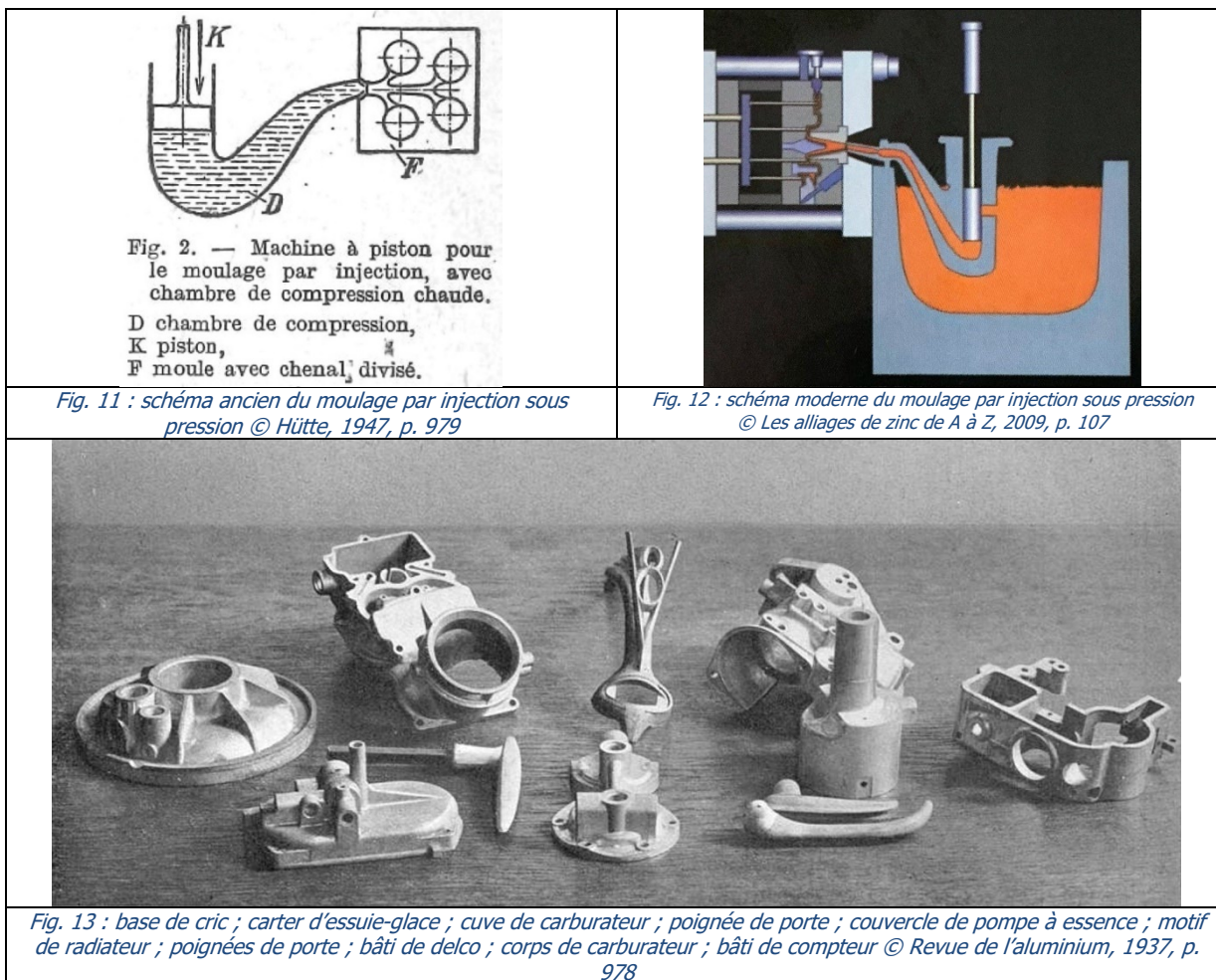
⁴² Dour, 2009, p. 55

⁴³ Les alliages de zinc de A à Z, 2009, p. 108

⁴⁴ Dour, 2009, p. 55

⁴⁵ Curts, 1930, 612-614

domaines qui requièrent des boîtiers ou des pièces complexes en métal ou des objets 3D produits en grande série.



1.5 La corrosion des alliages de zinc

Les zamaks, lorsqu'ils sont exposés à des conditions atmosphériques normales se ternissent rapidement puis se stabilisent. C'est le résultat d'une passivation de la surface qui résiste bien à l'air libre ou au contact d'hydrocarbures comme les combustibles pour véhicules⁴⁶. Grâce à cette propriété, ils n'ont en principe nul besoin de revêtement de surface dans l'essentiel du spectre d'application de ces alliages, sauf pour des raisons esthétiques. Ils ne sont toutefois pas spécialement recommandés pour l'utilisation en milieu aqueux car plusieurs facteurs peuvent altérer, quoique lentement, cette fine pellicule protectrice : sel, acidité ou alcalinité du milieu, température ou fréquence d'immersion et d'émersion⁴⁷.

⁴⁶ Muller, 1977, p. 639

⁴⁷ Colombié, 2008, p. 614

La peste du zinc est une expression convenue qui caractérise les altérations des alliages de zinc et d'aluminium qui n'apparaît pas dans la littérature scientifique. Dans les premiers temps de cette étude, parallèlement à l'élaboration de l'état de l'art du sujet, plusieurs courtes entrevues ont été menées dans des ateliers mécaniques de la région lausannoise⁴⁸ ainsi qu'auprès d'un commerçant de modélisme⁴⁹. Ces visites avaient pour objectif de collecter des objets ou des échantillons altérés mais cela ne fut pas concluant. Les discussions furent toujours ouvertes en présentant une image de carburateur altéré très représentatif de la peste du zinc (*fig. 14, p. 17*). Elle provient d'un sondage sur *Instagram*⁵⁰ auprès de restaurateurs amateurs et professionnels de deux-roues. Au fil des visites, il apparaît que les personnes ayant travaillé avec ce matériau savent souvent de quoi il s'agit ou du moins les problèmes que cela a pu leur causer. Ils se remémorent ce phénomène imprévisible et irréversible qui fait craqueler les objets, les déforme et parfois les brise en plusieurs morceaux. Dans des conditions normales d'exposition atmosphérique et à température ambiante, aucun autre métal ni alliage utilisé à l'échelle industrielle ne s'altère ainsi. Pour des pièces coulées précises ou qui doivent garantir l'étanchéité d'un assemblage mécanique, la moindre altération revient à remplacer la pièce. Les forums de modélisme sur internet regorgent de photos de voitures et de trains miniatures couverts de craquelures ou cassées en plusieurs parties (*fig. 15, p. 17*), parfois même dans leur boîte d'origine scellée (*fig. 16, p. 17*). Les boutiques pour collectionneurs connaissent également des cas dans leur stock et n'ont pas réellement de moyen de prévenir ces altérations car elles apparaissent vraisemblablement sur des modèles de toutes époques et de toutes marques. Il n'existe cependant pas de recensement sérieux à ce sujet. Ces objets à collectionner, souvent bon marché, proviennent essentiellement de Chine et l'hypothèse du recyclage des alliages pour des questions de rendement est souvent évoquée mais difficilement contrôlable. En somme, tout porte à croire que les musées ayant des collections de ce type sont, au même titre que les collectionneurs privés, concernés par ce problème.



⁴⁸ Imperadori motos-scooters, rue St.-Martrin 27 ; Piaggio Service Gilléron, av. de France 40 ; Garage 2 roues Angelo, av. d'Echallens 78.

⁴⁹ Boutique en ligne rmfclassic établie à Zürich via la plateforme eBay

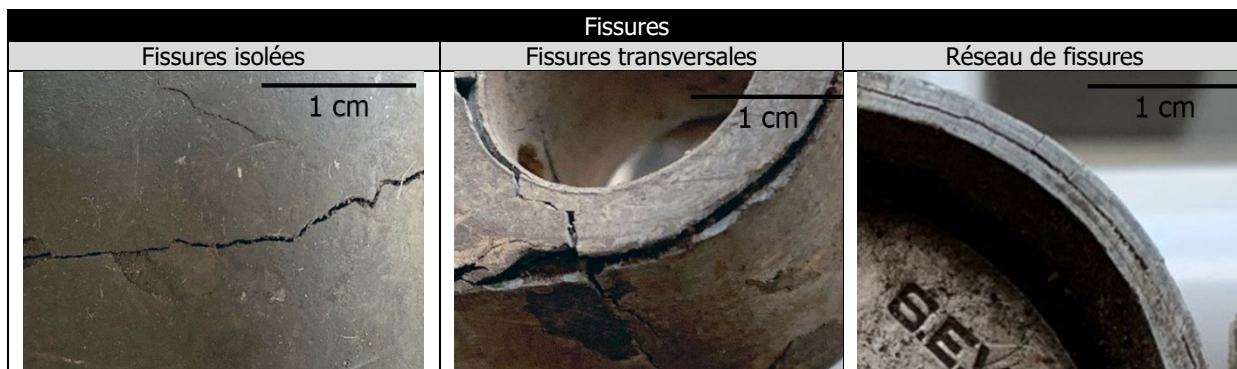
⁵⁰ Via le compte personnel de mécanique ancienne @ciamopeds

Comme mentionné plus tôt, le zamak est utilisé dans un large éventail de domaines et le secteur automobile demeure un exemple remarquable. Ses applications sont multiples et ont en réalité peu évolué depuis les années 1920. De la pièce technique à la pièce d'ornement, beaucoup de typologies différentes peuvent être concernées par la peste du zinc mais en réalité, ce n'est plus le cas sur les véhicules modernes car on sait faire des zamaks stables, à condition de respecter les normes de composition. A défaut des cas récents sur les collections de modélisme, pour les pièces mécaniques et autres applications du zamak sur des objets vendus sous garantie de fonctionnement et de sécurité, l'emploi d'alliages de qualité est indispensable.

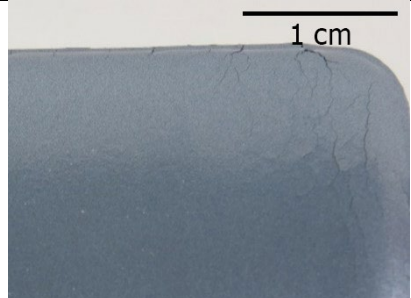
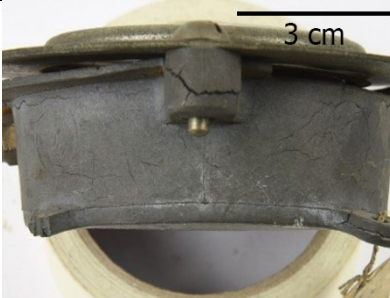
Sur les automobiles, la peste du zinc touche les véhicules anciens mais il est difficile de savoir à partir de quand le problème fut résolu. En revanche, dans le cas du Musée National de l'Automobile de Mulhouse (MNAM), une observation orientée sur les pièces potentiellement en alliage de zinc des véhicules exposés, exclusivement européens, semble indiquer que seuls ceux antérieurs aux années 1950 sont concernés.

Dans ce travail il sera essentiel de définir les formes que peut prendre la peste du zinc sur les objets, notamment pour les constats d'état. On observe deux types de fissures depuis lesquelles peut se développer un réseau : les fissures isolées, plutôt rectilignes et aléatoires et les fissures transversales qui suivront la forme des objets (angles ou sections fines), ce qui peut se rapporter à des microfissures formées lors de la coulée. Les réseaux de fissures peuvent provoquer des déformations à différents degrés de profondeur de la surface. Les objets peuvent également présenter une déformation globale indépendamment des fissures en présence de Sn⁵¹. Ces altérations qui fragilisent la structure impliquent parfois des cassures. Le vocabulaire utilisé correspond aux images du tableau 2, p. 18.

Tableau 2 : description des altérations de la peste du zinc



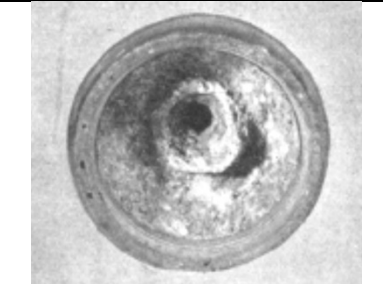
⁵¹ Curts, 1930, p. 616

© Lionel Riva, HE-Arc, 2022	© Lionel Riva, HE-Arc, 2022	© Lionel Riva, HE-Arc, 2022
Déformations		
Déformation légère	Déformation avancée	Déformation totale
		
© Lionel Riva, HE-Arc, 2022	© Lionel Riva, HE-Arc, 2022	© Lionel Riva, HE-Arc, 2022
Cassures		
Objet en cassé en plusieurs parties	Lacunes	Microfragments
		
© Lionel Riva, HE-Arc, 2022	© Lionel Riva, HE-Arc, 2022	© Lionel Riva, HE-Arc, 2022

Les objets en zinc peuvent également développer des produits de corrosion blanc. Cette altération, non-relative à la peste du zinc, peut toucher le zinc seul (*objets, fig. 17 ou revêtements, fig. 18*) et ses alliages (*fig. 19 à 21*). Des conditions d'enfouissement, d'exposition à des polluants atmosphériques la corrosion galvanique peuvent en être la cause. Il semblerait toutefois que des éléments Pb, Cd et Sn qui peuvent provoquer la peste du zinc favorisent également cette corrosion blanche sur les objets en alliage Zn-Al⁵².

Finalement, il faut être attentif lors du diagnostic des altérations quand on observe des fissures sur des objets chromés ou nickelés, à ne pas confondre la peste du zinc avec la crique saisonnière qui affecte les laitons. En effet, lorsque cet alliage est soumis à des contraintes mécaniques d'utilisation ou de mise en forme, des microfissures se forment rendent l'ensemble très sensible à la pollution atmosphérique. Cela résulte, comme pour la peste du zinc, en la formation de fissures et de déformations (*fig. 22*).

⁵² Curts, 1930, p. 615

		
<i>Fig. 17 : bague inuit de fouille archéologique en zinc © alaskawhitestuffid.com</i>	<i>Fig. 18 : tôle galvanisée corrodée © steelfabservice.com</i>	<i>Fig. 19 : fine couche de produits de corrosion blancs sur alliage Zn-Sn-Cu-Al © Lionel Riva, HE-Arc, 2022</i>
		
<i>Fig. 20 : cconcrétions de produits de corrosion blancs sur alliage complexe à base de zinc © Lionel Riva, HE-Arc, 2022</i>	<i>Fig. 21 : alliage Zn-Al (4%) – Cu (3%) – Mg (0,1%) contenant 0,085% de Pb+Cd ainsi que 0,01% de Sn © Curts, 1930, p. 615</i>	<i>Fig. 22 : klaxon de Fiat 509 du MNAM en laiton atteint de la crique saisonnière © Lionel Riva, HE-Arc, 2022</i>

1.6 Le Musée National de l'Automobile de Mulhouse

1.6.1 Histoire⁵³

Le Musée National de l'Automobile de Mulhouse, abrégé MNAM, existe en tant qu'institution patrimoniale depuis 1982, même si l'histoire de sa collection est plus ancienne. En effet, l'appellation « collection Schlumpf » parfois encore évoquée aujourd'hui fait écho à l'histoire de la famille franco-suisse dont deux les frères Hans (1904-1989) et Fritz (1906-1992), passionnés de voitures et de course automobile, en sont les initiateurs. Ils ont tous deux suivis des études de commerce, respectivement dans le milieu bancaire et dans l'industrie du textile. Fritz, qui achète sa première *Bugatti* en 1934, participe quelques années plus tard au conseil d'administration d'une grande filature de laine alsacienne et de fil en aiguille, après la Seconde Guerre mondiale, devient directeur générale de la filature HKC à Mulhouse dont les locaux abritent aujourd'hui le musée. Dès lors, il commence à collectionner des voitures anciennes dont particulièrement les *Bugatti* qui demeurent parmi les plus sportives et luxueuses de l'époque comme aujourd'hui. Dans les années 1970, la collection des deux frères alors associés compte près de 400 véhicules. Cela prend désormais beaucoup de place et c'est sans compter la nécessité d'entretien, voire de la restauration de certains modèles. Les locaux et les ouvriers de la fabrique textile sont alors assignés presque exclusivement à la collection. En 1979, le rêve s'achève lorsque la faillite est prononcée, ce qui pousse les frères à quitter Mulhouse pour Bâle,

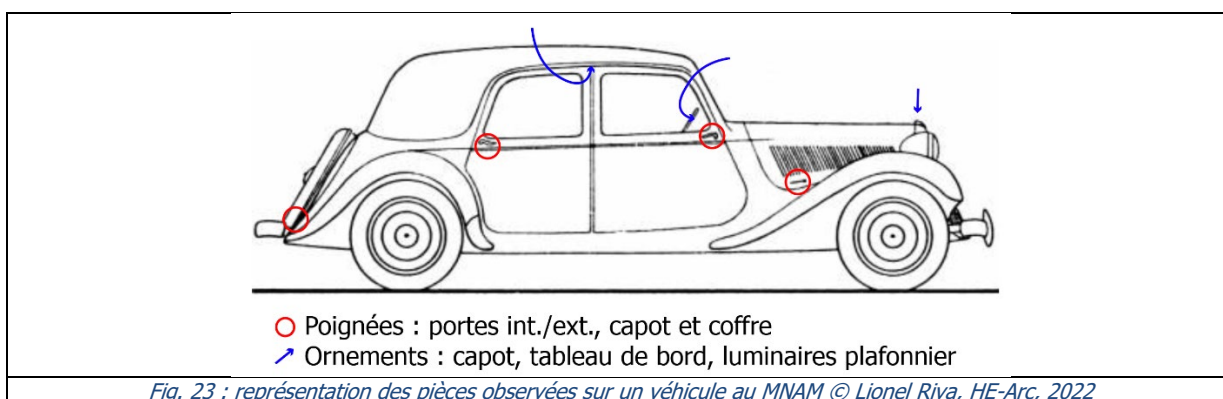
⁵³ Cette section fait l'objet d'une synthèse des informations recueillies sur le site web officiel du musée et sur les cartels explicatifs des salles ouvertes au public.

de l'autre côté de la frontière. Pendant quelques années, les collaborateurs de l'usine continueront de maintenir la collection en état tout en ouvrant ses portes aux visiteurs jusqu'à ce que diverses institutions régionales et du secteur de l'automobile s'associent pour éviter que la collection se désintègre, faute de financement, et permettent la création d'un véritable musée.

Aujourd'hui le MNAM, dont la collection a continué de croître jusqu'à environ 600 véhicules, est actif dans la recherche et la communication relative à la conservation-restauration du patrimoine roulant, élément indissociable de l'histoire de nos sociétés modernes. Il dispose d'un vaste dépôt d'archives et d'un atelier de restauration qui entretient des liens avec la HE-Arc CR après plusieurs collaborations dont un projet sur le diagnostic acoustique de l'état des moteurs⁵⁴ et une étude sur la corrosion des circuits de refroidissement en alliage d'aluminium⁵⁵.

1.6.2 Collections concernées

L'état de l'art renseigne sur l'aspect et les typologies des objets en alliage Zn-Al et permet de rechercher des cas de peste du zinc sur les véhicules exposés. Par conséquent, on trouve essentiellement des petites pièces ornementales à l'extérieur des véhicules ainsi que les poignées (*fig. 23*).



On peut également ouvrir l'habitacle et les compartiments moteurs des véhicules pour regarder les cadrans d'instruments de bord ou de luminaires, les boutons, les poignées intérieures, les carburateurs, les distributeurs⁵⁶ et les pompes à essence. L'examen porte aussi sur toutes les autres pièces qui pourraient être en alliage Zn-Al, soit les éléments de petite taille à l'échelle d'une voiture, à l'aspect gris foncé mat et/ou présentant des altérations typiques de la peste du zinc. Le tableau 2 de la page suivante présente quelques exemples de véhicules dont des pièces sont concernées par cette altération. Il n'a pas vocation de fournir une liste exhaustive de l'ampleur de phénomène car tous les véhicules n'ont pas pu être ouverts et des pièces peuvent être cachées. Il donne, en revanche, une

⁵⁴ Brambilla *et al.*, 2019

⁵⁵ Granget, 2020

⁵⁶ Lexique, p. 45

fourchette temporelle approximative des véhicules touchés et permet de cibler des typologies de pièces spécifiques pour la collecte ultérieure du corpus d'objets pour analyses.

Tableau 3 : véhicules exposés concernés par la peste du zinc

Date	Marque	Carrosserie	Modèle	Pièces concernées
1925-29 ?	Fiat	Cabriolet	509	Carburateur (<i>annexes : fig. 1, p.XX</i>), poignées extérieures (<i>annexes : fig. 2, p.XX</i>),
1930	Ballot	Berline	Type RH3	Poignées intérieures (<i>annexes : fig. 3, p.XX</i>)
1933	Delage	Berline	Type D6-11	Poignées intérieures (<i>annexes : fig. 4, p.XX</i>)
1934	Bugatti	Berline	Type 46S	Poignées extérieures (<i>annexes : fig. 5, p.XX</i>), garniture d'élément de tableau de bord (<i>annexes : fig. 6, p.XX</i>)
1934	Citroën	Berline	7A	Garniture de radiateur (<i>annexes : fig. 7, p.XX</i>)
1938	Bugatti	Berline	Type 57C	Commandes de tableau de bord (<i>annexes : fig. 8, p.XX</i>), poignées de capot (<i>annexes : fig. 9, p.XX</i>)

2. Méthodologie

2.1 Rappel des objectifs

La filière conservation-restauration de la HE-Arc, active dans la recherche scientifique pour la préservation du patrimoine, a développé différents outils en libre accès dont des bases de données sur le comportement des matériaux auxquelles il est essentiel de contribuer.

Ce travail permettra de mettre à disposition aux institutions patrimoniales ainsi qu'aux collaborateurs en conservation-restauration les données relatives aux objets en alliage de zinc présentés dans ce document, respectivement sur DiscoveryMat et MiCorr.

2.2 Sélection du corpus

2.2.1 Critères de sélection

Sur la base de l'état de l'art et l'observation des collections concernées au MNAM, nous pouvons avoir une idée assez précise des objets qui nous intéressent afin de constituer le corpus de cette étude. Nous nous focaliserons sur la période 1920-1950 car elle englobe les cas vus en salle d'exposition mais resterons attentifs au cas de peste de zinc sur des objets en dehors de cette période, surtout les plus anciens pour lesquels nous ne disposons que de très peu d'informations.

Comme les analyses seront effectuées dans les locaux de la HE-Arc CR et que les pièces montées sur les véhicules sont parfois difficiles d'accès ou compliquées à démonter, nous privilégierons la collecte d'objets isolés dans la réserve. Cela nous permet un gain de temps considérable et minimise le risque de dommages lors d'interventions sur des véhicules exposés, d'autant plus que le musée dispose d'un large stock de pièces dont le début de la constitution remonte à l'époque des frères Schlumpf. Il y a par conséquent assez de pièces similaires à celles observées sur le parc de véhicules complets qui conviennent parfaitement à nos objectifs et qui de surcroît, sont de moindre valeur à titre patrimonial.

On peut cependant dire que la datation est plus compliquée étant donné que certains composants ont parfois été produits pour divers modèles d'automobiles et durant plusieurs années, voire des décennies. Or dans le cas des véhicules exposés, le numéro de châssis peut nous renseigner sur une date précise. Toutefois, la plupart de ces véhicules ont très vraisemblablement un historique de services et de changement de pièces non-documenté qui remet en question leur datation et donc cet avantage. Notre méthode d'identification visuelle n'étant pas sans faille et le risque de sélectionner des objets n'étant pas en alliage Zn-Al étant réel, nous fixons la limite à 20 objets représentatifs (*tableau 4*). Cela nous permet raisonnablement de pouvoir les analyser, décrire leur composition et réaliser un diagnostic des altérations dans le temps à disposition.

Cette étude étant consacrée à la caractérisation des alliages de zinc et d'aluminium, la détermination de la nature des matériaux est intéressante lorsqu'on peut la comparer à d'autres. Pour cette raison, nous réunissons également un corpus de 10 objets supplémentaires (*tableau 5, p. 24*) plus récents et de différents domaines dont le modélisme qui regroupe à priori les seuls cas contemporains de peste du zinc.

2.2.2 Objets patrimoniaux

Tableau 4 : corpus d'objets du MNAM

N°	Illustration	Typologie	Datation ⁵⁷	Justification
1		Carburateurs	1930-1940	Ces deux carburateurs de marque Solex sont de même type et de même époque. Ils sont le miroir l'un de l'autre et les plans de joint des pipes⁵⁸ ont un angle différent. Les constructeurs de l'époque adaptaient souvent un même modèle pour équiper différents véhicules. Certaines parties comme la cuve et les pièces internes sont identiques. Le N°1 n'est pas altéré et le N°2 présente des altérations de la peste du zinc sur les trois parties qui le constituent.
2				
Annexes : fig. 10 à 14, pp. 3-4				
3		Filtres à essence	1920-1930	Il s'agit de deux filtres à essence de marque Tecalemit semblables. Le N°3 n'est pas altéré et le N°4 présente des altérations de la peste du zinc, particulièrement sur les angles.
4				
Annexes : fig. 15 à 19, pp. 4-5				
5		Distributeurs / delcos ⁵⁹	1920-1930	Ces trois distributeurs dont deux indiquent la marque S.E.V. sont très similaires comme les

⁵⁷ La datation des objets est subjective car les sources sont rares et peu fiables. De plus, ils ont souvent pu être fabriqués pendant plusieurs décennies. Les dates indiquées font l'objet d'une discussion avec Brice Chalançon basée sur notre propre expérience.

⁵⁸ Lexique, p. 45

⁵⁹ Lexique, p. 45

6				carburateurs. Seules les pièces électriques sont montées différemment. Le N°5 n'est pas altéré et les N°6 et 7 présentent des altérations de la peste du zinc sur différentes zones.
7				
Annexes : fig. 20 à 28, pp. 6-8				
8		Poignées	1920-1950	Ces poignées sont difficiles à dater, elles ressemblent à celles vues sur des véhicules d'exposition de cette fourchette de dates. Elles sont toutes les trois différentes et présentent un revêtement ou des traces de revêtement en Ni ou Cr. La N°10 présente des altérations de la peste du zinc dans son ensemble.
9				
10				
Annexes : fig. 29 à 34, pp. 8-9				
11		Portes-bougies ⁶⁰	1920-1940	Ces portes-bougies sont de types différents. Les deux présentent des altérations de la peste du zinc. Aucun exemplaire non-altéré n'a été trouvé dans les réserves du musée.
12				
Annexes : fig. 35 à 38, pp. 9-10				
13		Support d'ampoule	1950-1960	D'après des forums sur internet et des boutiques en ligne de pièces d'occasion, la marque PK-LMP équipait des <i>Simca</i> , des <i>Renault</i> et des <i>Gordini</i> de cette époque. L'objet ne présente pas d'altération de la peste du zinc.
Annexes : fig. 39 à 41, pp. 10-11				
14		Lampe de plafonnier	1920-1930	Des lampes de plafonnier similaires ont été observées sur des véhicules exposés de cette époque. Elle présente des altérations de la peste du zinc dans son ensemble.
Annexes : fig. 42 à 44, pp. 11-12				
15		Cadrans d'instruments de bord	1900-1910	Des pièces similaires ont été observées sur des véhicules primitifs du musée. Elle présente des altérations de la peste du zinc dans son ensemble et est assurément antérieure à la normalisation des alliages Zn-Al.
16			1909	Cette pièce a été démontée sur un véhicule exposé à titre de comparaisons avec l'objet N°15. Elle ne présente pas d'altération de la peste du zinc.
Annexes : fig. 45 à 48, pp. 12-13				
17		Contacteur à clé ⁶¹	1920-1940	Des pièces similaires ont été observées sur des véhicules exposés de cette époque. L'objet présente des altérations de la peste du zinc dans l'ensemble de la partie supposée en

⁶⁰ Lexique, p. 45

⁶¹ Lexique, p. 45

				alliage de zinc.
<i>Annexes : fig. 49 et 50, p. 13</i>				
18		Pompe à essence	1920-1940	Ne présente pas d'altération de la peste du zinc.
<i>Annexes : fig. 51 à 53, pp. 13-14</i>				
19		Réservoir secondaire	1936-1940	Cet objet équipait les voitures Panhard-Levassor Dynamic exclusivement produites à cette époque. L'objet a la particularité de présenter une partie avec des altérations de la peste du zinc dans son ensemble et une seconde sans.
<i>Annexes : fig. 54 à 56, pp. 14-15</i>				
20		Engrenage	Non-déterminé	Cet objet fut retenu car d'un point de vue mécanique, les alliages Zn-Al ne sont pas adaptés à ce type de contraintes. Il présente des altérations de la peste du zinc dans son ensemble et particulièrement sur les dents soumises aux contraintes mécaniques.
<i>Annexes : fig. 57 à 59, p. 15</i>				

2.2.3 Autres objets

Tableau 5 : corpus d'objets non-patrimoniaux

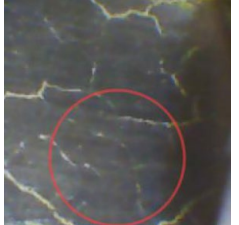
N°		Typologie	Datation	Justification
21		Modélisme	1990-2000	La datation de l'objet est basée d'après les souvenirs d'achat d'un ami donateur. Il présente des altérations de la peste du zinc dans son ensemble.
22			2000-2020	La datation de l'objet est basée d'après le vendeur établi à Zürich. Il s'agit de deux modèles similaires, l'un présentant des altérations de la peste du zinc dans son ensemble et l'autre non.
23				
24				
25			1995-2005	La date de l'objet est basée d'après les souvenirs d'un ami donateur. Il présente des altérations de la peste du zinc dans son ensemble et particulièrement sur les charnières du capot, du coffre et des portes.
Annexes : fig. 60 à 67, pp. 16-17				
26		Echantillons	Non-déterminé	Il s'agit d'une plaque de zinc fournie par Christian Degriigny. Elle fut retenue pour contrôler que l'outil DiscoveryMat fonctionne avec l'élément Zn.
27			2022	Il s'agit d'un lingot de zamak neuf acheté en ligne à des fins de bricolage. Il ne présente pas d'altération de la peste du zinc.
Annexes : fig. 68 et 69, p. 18				

28		Pièce de carburateur	1972	Il s'agit d'une pièce de carburateur de marque Dell'Orto démonté d'un vélomoteur Piaggio Ciao. Il ne présente pas d'altération de la peste du zinc et fut retenu car il s'agit du seul zamak de cette étude qui date de la seconde moitié du XX ^{ème} siècle.
<i>Annexes : fig. 70, p. 18</i>				
29		Construction	2022	Il s'agit d'un objet vendu comme zamak avec revêtement de surface dans un magasin de bricolage de grande surface. Il ne présente pas d'altération de la peste du zinc.
<i>Annexes : fig. 71 p. 18</i>				
30		Bijouterie	2000-2020	Il s'agit d'un collier de seconde main dont le style est plutôt récent. Il ne présente pas d'altération de la peste du zinc.
<i>Annexes : fig. 72 et 73, p. 19</i>				

2.3 Outils d'analyse

2.3.1 Fluorescence des rayons X (FRX)

Cette technique d'analyse élémentaire fonctionne grâce à la mesure d'un phénomène appelé fluorescence des rayons X. Lorsque on expose de la matière aux rayons X, les électrons de l'enveloppe atomique des éléments sont perturbés pendant un instant et leur réorganisation émet un rayonnement secondaire que l'on appelle fluorescence et qui est propre à chaque élément. L'appareil est donc constitué d'un émetteur, d'un capteur et d'un analyseur qui permet de donner la composition élémentaire de la zone mesurée en surface (*fig. 24, p. 26*). La HE-Arc CR qui dispose de cette technologie sous sa forme portable depuis de nombreuses années a acquis cette année un nouvel appareil, le Niton™ XL5t (*fig. 25, p. 26*), qui permet de réduire le diamètre du faisceau (*fig. 26, p. 26*), ce qui facilite la mesure sur des petites zones. C'est un avantage considérable pour la mesure des objets techniques de cette étude et permet également de retirer une plus petite zone de revêtement de surface si nécessaire.

		
<i>Fig. 24 : analyse de l'objet N°21 avec l'ancien appareil © Christian Degriigny, HE-Arc, 2022</i>	<i>Fig. 25 : nouvel appareil Niton™ XL5t © thermofischer.com</i>	<i>Fig. 26 : analyse de l'objet N°21 avec le nouvel appareil © Christian Degriigny, HE-Arc, 2022</i>

Pour nos analyses, le mode d'analyse « general metals » et les filtres 20/20/20 sont utilisés. Les analyses des objets se font si possible sur des surface exemptes de revêtement (*fig. 27*). Les légères traces de chromage, de nickelage, de peinture ou d'encrassement sont traversées par le rayonnement X mais elles influent les résultats obtenus. En connaissance de cause, nous ne réalisons pas de préparation de la surface. Les valeurs données par l'appareil peuvent également varier d'une mesure à l'autre en raison de l'hétérogénéité de surface des matériaux due à leur mode de fabrication. La coulée d'un métal peut par exemple induire une composition en surface sensiblement différente de celle à cœur. Les éléments susmentionnés doivent être tenus en compte pour la lecture des résultats. Les valeurs présentées sont en ce sens indicatives et une précision au-delà du dixième n'est en réalité par pertinente. Pour cette étude, nous gardons toutefois les valeurs au centième indiquées par l'appareil. Certaines traces de valeur inférieure qui nous intéressent sont indiquée comme suit : <0.1%.

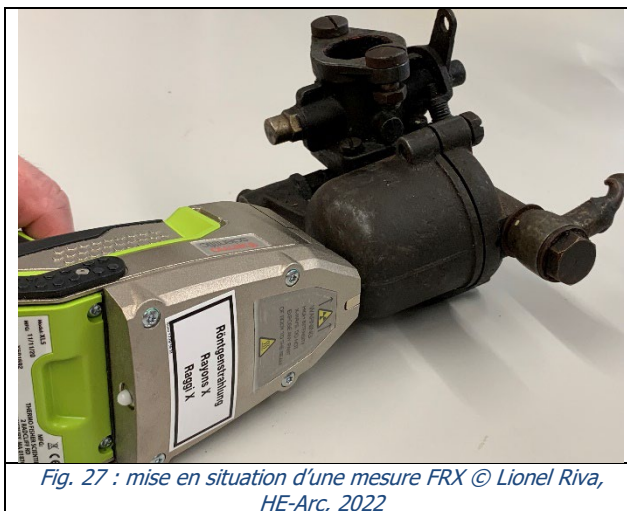


Fig. 27 : mise en situation d'une mesure FRX © Lionel Riva, HE-Arc, 2022

2.3.2 DiscoveryMat

DiscoveryMat est un outil d'analyse de métaux et d'alliages développé par l'unité de recherche de la HE-Arc conservation-restauration (CR) comme alternative à la FRX dont les appareils sont coûteux et nécessitent une formation spécifique à la SUVA⁶². Il a la particularité d'être en libre-accès et relativement simple à utiliser. En revanche, il est légèrement invasif car la zone d'analyse doit être exempte de produits de corrosion. Cela implique le polissage au papier abrasif d'une surface d'environ 5mm de côtés que l'on fera sur une partie peu visible des objets. Son efficacité est démontrée avec des alliages cuivreux⁶³ et à base d'aluminium⁶⁴.

L'installation (*fig. 28*) requiert une électrode de référence (Ag/AgCl) placée dans une rallonge (*fig. 29*) afin d'éviter la pollution des ions chlorures de l'électrode et un voltmètre commandé par l'application DiscoveryMat développée par la filière ingénierie de la HE-Arc. A cela s'ajoutent un statif de chimie pour fixer l'électrode de référence et le câblage nécessaire pour relier les instruments. Chaque objet analysé fait l'objet de trois mesures avec des solutions différentes, soit :

- Une solution de nitrate de potassium (KNO_3) à 1% en masse (pH : 6.6 ± 0.6)⁶⁵ ;
- Une solution de sesquicarbonate de sodium (NaSesq) à 1% en masse (pH : 9.6 ± 0.25)⁶⁶ ;

⁶² Organisme suisse de prévention contre les accidents, d'assurance et de réadaptation.

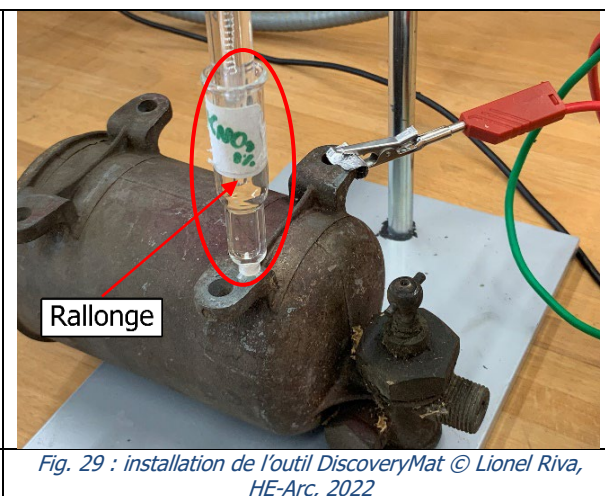
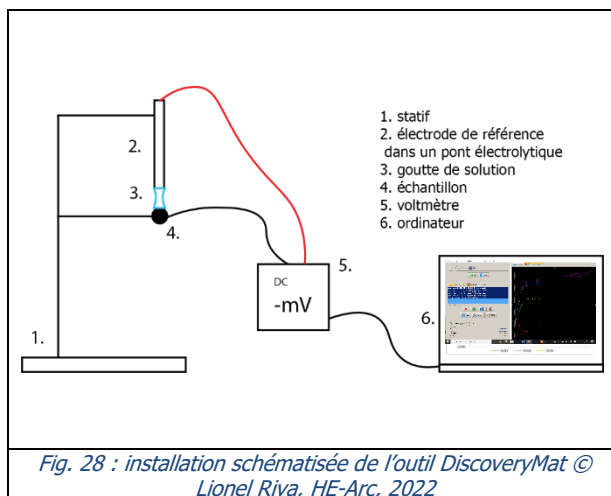
⁶³ Degrigny, 2012

⁶⁴ Despland, 2018

⁶⁵ Degrigny, 2012, p. 28

- De l'eau Evian® (pH : ~7,2)⁶⁷.

Les métaux étant sensibles au pH, on s'attend à observer des comportements différents en fonction des solutions.



Il faut ensuite attendre 20 minutes pour la préparation soit utilisable. Dès lors, elle peut être utilisée pour une durée de 2 heures. Pour effectuer la mesure, il faut ajouter une goutte de 2ml de solution à l'aide d'une seringue graduée qui formera un ménisque d'environ 3mm de haut. Pour optimiser son temps de travail, il est recommandé d'effectuer des mesures sur plusieurs objets avant de passer à la solution suivante. Chaque mesure se fait en trois temps afin de garantir son bon déroulement :

- Une première mesure de 5 minutes est effectuée en prenant soin de noter la valeur en mV indiquée sur le voltmètre à chaque minute ;
- Une seconde mesure de 5 minutes qui doit indiquer une tendance similaire ;
- Une troisième mesure de 5min. Si son tracé est compris entre les deux précédents, on la poursuit jusqu'à 15 minutes. Autrement, on continue les mesures de 5 minutes jusqu'à obtenir un tracé se trouvant entre les tracés précédents.

Le voltmètre est configuré en mode DC avec le câble de l'électrode relié à la fiche COM. Le câble en contact avec l'objet est relié à la fiche V.

Il est important de rincer la rallonge à l'extrémité de l'électrode entre chaque mesure avec de l'eau déminéralisée, de la sécher puis de polir à nouveau la surface de l'objet.

Ce protocole d'utilisation doit être rigoureusement respecté d'une mesure à l'autre pour que les tracés puissent être reproduits dans les meilleures conditions par des tiers.

Les trois tracés de 15 minutes obtenus avec les différentes solutions sont alors comparés à ceux des matériaux de la base de données. La distance entre eux permet de calculer une distance de similarité. Les matériaux de la base de données étant classés de la distance la plus faible (meilleure

⁶⁶ Ibid., 2012, p. 28

⁶⁷ www.evian.com

correspondance) à la plus importante (correspondance médiocre), l'utilisateur se voit proposer des compositions d'alliages plausibles qui lui permettent de juger si celles-ci sont pertinentes.

Comme la base de données pour les alliages base zinc n'existe pas encore, l'un des objectifs de ce travail est d'initier celle-ci pour de futurs essais d'analyse. La construction de la base de données impose de connaître la composition des matériaux (analyse FRX) afin de les associer aux tracés électrochimiques obtenus.

La préparation de la surface étant légèrement invasive, il est important de minimiser son impact visuel sur l'objet. Dans le cas de cette étude, il s'agit essentiellement de pièces mécaniques ou à structure complexe ce qui permet de préparer des surfaces cachées lorsqu'elles sont en place sur les véhicules, par exemple sur des points d'attache (*fig. 30*). Le polissage s'effectue progressivement avec du papier abrasif à grain 1000, 2000 puis 4000. Dans notre cas, nous fabriquons une petite spatule avec une chute de laiton d'environ 5mm de largeur sur laquelle nous appliquons le papier abrasif à l'aide de bande adhésive à double face (*fig. 31*).



Fig. 30 : exemple de polissage effectué sur une surface non-visible au montage de la pièce © Lionel Riva, HE-Arc, 2022



Fig. 31 : exemple de polissage effectué avec l'outil artisanal © Lionel Riva, HE-Arc, 2022

2.3.3 MiCorr

Il s'agit d'une application en ligne d'aide au diagnostic des altérations sur les métaux patrimoniaux fonctionnant avec une base de données et plusieurs moteurs de recherche. Cela permet d'établir des diagnostics approfondis à partir d'observations, voire d'analyses non-invasives effectuées sur le matériau en cours d'étude en les comparant aux données proposées par l'application.

La base de données comporte déjà quelques exemples relatifs à la peste du zinc. L'idée est de la compléter.

2.4 Conservation préventive

Les objets atteints de la peste du zinc voient leur cohésion structurale réduite du fait de la corrosion intergranulaire prenant la forme de fissures à l'œil nu. Ils sont par conséquent davantage sensibles

aux chocs comme en témoigne un incident de manipulation avec le capot de la petite voiture bleue (*objet N°24, annexes : fig. 88, p. 23*), tombé d'une hauteur d'un mètre.

Les objets de la réserve du MNAM sont essentiellement des pièces de rechange sans valeur esthétique et non considérées comme objets patrimoniaux à proprement parler. La plupart des objets sont conditionnés dans des caisses ou des armoires en lot (typologie ou provenance) et en contact les uns avec les autres. Il n'est en ce sens pas pertinent de prescrire des conditionnements futurs particuliers même pour les objets atteints de la peste du zinc car du fait de leur état, ils ne peuvent plus remplir leur fonction technique et ne seront donc pas réemployés sur les véhicules patrimoniaux. Cependant, les objets ayant vocation à être conservés pour des études scientifiques ou pour l'interprétation d'une typologie ou d'un style dans le cadre de la restauration d'un véhicule, il est recommandable d'observer des mesures de conservation préventive relatives au climat de la réserve. Pour cela, nous nous remettons aux conditions de conservation préventive de l'Institut Canadien de Conservation pour les métaux soit un environnement sec (<30% d'humidité relative⁶⁸) et une faible concentration des principaux polluants atmosphériques (loi de Pareto des 80-20⁶⁹). Si les objets présentent des lacunes ou perdent des microfragments, un support de conditionnement en mousse de polyéthylène (PE) peut être conçu et il est de mise de les manipuler au minimum.

Pour le transport jusqu'à la HE-Arc, les objets ressemblés dans une caisse Rako™ ont été conditionnés dans du papier journal et doublés de papier bulle pour ceux altérés.

3. Analyses

3.1 Analyses FRX

3.1.1 Résultats

La composition des objets analysés avec l'appareil FRX est indiquée dans des tableaux propres à chaque objet en annexes et faisant office de constat d'état orienté sur la peste du zinc selon critères établis (*tableau 2, p. 18*). Les tableaux 6 et 7 de la page 28 font office d'exemple pour un objet sans altération de la peste du zinc et l'autre, oui.

Le magnésium, élément caractéristique du zamak a été identifié sur tous les objets mais uniquement sous la forme de traces (affiché <LOD sur l'appareil). En réalité, ils doivent assurément en contenir plus mais la FRX n'est pas adaptée à la détection de cet élément. Les objets dont l'analyse indique que l'élément principal est autre que Zn ne sont pas traités car cela n'est pas pertinent pour l'étude de la peste du zinc. Le diagnostic compare la composition des objets avec celle des différents alliages Zn-Al (*tableau 1, p. 13*), le terme « proche » indique une similitude de l'ordre de <1%.

⁶⁸ Barclay *et al.*, 2021

⁶⁹ 80 % des effets (nuisibles pour les métaux) sont le produit de 20 % des causes (polluants).

Tableau 6 : exemple de constat d'objet sans peste du zinc

Objet N°8 : Poignée de lève-vitre							Datation : ~1920-1950															
Illustration avec zones d'analyse FRX							Constat d'état visuel des altérations															
							Le revêtement de l'objet présente des traces de corrosion par piqûres.															
Détermination de la nature du matériau analysé																						
Composition en %																						
Zn	Cu	Al	Si	Fe	P	Pb	Sn	V	Sb	Te	Ti	Bi	Ni									
94,1	3,2	2	0,3	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1									
Type d'alliage																						
Alliage Zn-Al-Cu. Les proportions d'Al et Cu ne correspondent pas à un type de zamak connu mais les quantités d'impuretés sont faibles (<0,1%).																						
Diagnostic																						
Contraintes d'utilisation		L'objet de l'habitacle du véhicule n'a pas subi de fortes variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc ont été soumises à des contraintes mécaniques (levier, par rotation).																				
Pas de peste du zinc																						

Tableau 7 : exemple d'objet avec peste du zinc

Objet N°10 : poignée de porte intérieure							Datation : ~1920-1950						
Illustration avec zones d'analyse FRX							Constat d'état visuel des altérations						
							Sur toute la surface de l'objet : réseau de fissures impliquant des déformations en surface ; Sur la tranche de la zone de levier : lacune (○).						
Détermination de la nature du matériau analysé													
Composition en %													
Zn	Al	Cu	Ni	Si	Pb	Cr	V	P	Fe	Cd	Mn	Bi	
90,9	4,4	3	0,7*	0,4	0,4	0,1*	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
*une seconde analyse sur le revêtement indique 22,3 % de Ni et 7 % de Cr. Des traces de ce revêtement sur la zone d'analyse ci-dessus impliquent de considérer la valeur pour Ni et Cr à la baisse.													
Type d'alliage													
Alliage Zn-Al-Cu. Les proportions d'Al et Cu correspondent à un zamak de type ZP2 et mais il contient une certaine quantité de Pb.													
Diagnostic													
Contraintes d'utilisation			L'objet de l'habitacle du véhicule n'a pas subi de fortes variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc ont été soumises à des contraintes mécaniques (levier).										

Peste du zinc	Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. L'élément Pb qui en est vraisemblablement la cause n'a pas l'aire d'avoir été affecté par les contraintes mécaniques.
---------------	---

Le tableau 8 ci-dessous, fait office de synthèse des constats d'état.

Tableau 8 : synthèse des constats d'état

N°	Peste du zinc	Synthèse du diagnostic	Page
1	Non	Etonnamment, on y retrouve jusqu'à 1% de Pb et 1,5% de Fe	24
2	Oui	Facteurs d'altération : Pb (0,2-0,8%), Fe (0,3-1,5%)	25
3	Pas alliage Zn		25
4	Oui	Facteurs d'altération : Pb (5,7%), Fe (1,1%) → zones spécifiques	26
5	Non	Pb et Fe (<0,1%)	26
6	Oui	Facteurs d'altération : Pb (0,1%), Fe (0,1%) → zones spécifiques	27
7	Oui	Facteurs d'altération : Pb (0,2%), Fe (0,3%) → zones spécifiques	27
8	Non	Pb et Fe (<0,1%)	28
9	Non	Pb et Fe (<0,1%)	28
10	Oui	Facteurs d'altération : Pb (0,4%)	29
11	Oui	Facteurs d'altération : Pb (1,8-2,1%), Fe (1,1%), Sn (0,8-1,3%)	29
12	Oui	Facteurs d'altération : Pb (2,5%), Sn (1%), Fe (0,4) → zones spécifiques	30
13	Non	Pb et Fe (<0,1%)	30
14	Oui	Facteurs d'altération : Sn (8%), Pb (5,9%), Fe (0,2%) et Sb ? (1,5%)	31
15	Oui	Facteurs d'altération : Pb (1,8%), Fe (1,1%), Sn (0,5) et P ? (1,9%)	31
16	Non	Etonnamment, on y retrouve 11,1% de Sn, 1,2% de Pb et 0,3 de Fe	32
17	Oui	Facteurs d'altération : Pb (1,4%), Fe (1,5%), Cd (0,6%)	32
18	Non	Fe (0,3%) et Pb (0,1%)	33
19	Non	Oui Partie non-altérée : Pb seul (4,6%) Partie altérée, facteurs d'altération : Pb (3,7%) + Sn (<0,1%)	33
20	Oui	Facteurs d'altération : Pb (2%), Fe (0,7), Sn (0,4%) et As ? (0,2%) → zones spécifiques	34
21	Oui	Facteurs d'altération : Pb (0,1%)	34
22	Oui	Facteurs d'altération : Fe (0,1%) + V ? (0,6%), Bi ? (0,4%)	35
23	Non	Pb (0,1%)	35
24	Oui	Facteurs d'altération : Pb (<0,1%) + V ? (0,1%) → zones spécifiques	36
25	Non	Fe (0,2%), pas de Pb	36
26	Non	Pas d'impuretés	37
27	Non	Pb (<0,1%)	37
28	Non	Pas d'impuretés	38
29	Non	Pas d'impuretés	38
30	Pas alliage Zn		39

3.1.2 Synthèse des résultats

Les critères d'identification visuelle ont permis de sélectionner 28 objets sur 30 identifiés comme alliages de Zn. Avec du recul, il est vrai que l'objet 3 est plutôt clair et brillant en comparaison avec les autres objets et que l'objet N°30 est plutôt lourd. En conséquence de cela, on peut dire que les objets en alliage de zinc s'identifient plutôt facilement avec quelques renseignements.

Ces résultats permettent d'observer si Al et Cu sont employés dans ces objets en alliage de zinc comme le prédisait l'état de l'art (*tableau 9*).

Tableau 9 : rôle d'Al et Cu dans les alliages analysés

Elément	Remarques
Al	On constate qu'une majorité des objets une part d'Al entre 2 et 5%, ce qui dépasse un peu l'hypoeutectique idéal pour les alliages Zn-Al mais démontre tout de même une tendance correspondant à la documentation.
Cu	On constate que le cuivre dépasse rarement 6%, ce qui dépasse un peu la fraction idéale pour les alliages Zn-Al, mais démontre tout de même une tendance correspondante à la documentation.

Nous pouvons nous faire la même réflexion quant au lien de cause à effet entre les différents éléments qui constituent les impuretés et la peste du zinc (*tableau 10*).

Tableau 10 : rôle des autres métaux dans les alliages analysés

Elément	Remarques
Fe	Présent dans presque tous les objets entre 0,1 et 1,5 %, altérés ou pas. Les autres impuretés étant systématiquement supérieures sur les objets altérés, il est difficile de comprendre son rôle dans la peste du zinc.
Pb	Tous les objets non-altérés en contiennent maximum 0,1 % à l'exception des objets N°1 (partie 3, 1%), 16 (1,2%), 19.1 (4,6%). La composition des objets 16 et 19.1 devrait être stable contre toute attente. De manière générale, les analyses confirment que Pb est néfaste pour les alliages de zinc.
Sn	Tous les objets qui en contiennent sont altérés. Seule exception non-altéré, l'objet N°16 qui contient 11,1% alors que l'objet 17 qui a une composition similaire dont 8% de Sn présente des altérations importantes.
Cd	Il ne dépasse pas l'état de trace sur les objets non-altérés (<0,1%). Il accompagne en revanche toujours une présence élevée de Pb et Sn à hauteur maximale de 0,6%.
Si	On retrouve souvent 1 à 10% de Si alors que la documentation consultée ne mentionne pas de telles quantités dans les alliages Zn-Al. Pour les zamaks, il doit d'ailleurs toujours être tenu à <0,3% (<i>tableau 1, p. 13</i>). Cependant, Si ne semble être impliqué dans la peste du zinc.
Sb, P, Bi, As	Ces éléments sont souvent présents dans les objets altérés. Ils sont peut-être responsables de la peste du zinc mais la présence d'autres impuretés rendent leur rôle est peu claire.
Reste	Impossible de déterminer le rôle.

Les objets étant analysés, nous pouvons sélectionner en certains dont la composition est remarquablement différente pour les analyses DiscoveryMat. Ils sont au nombre de 9 (*tableau 11, p. 31*).

Tableau 11 : corpus d'objets pour analyses DiscoveryMat

N°	Typologie	Justification
5	Distributeur / Delco	Alliages Zn-Al-Cu contenant beaucoup d'Al et peu d'impuretés.
13	Support d'ampoule	Alliage Zn-Al contenant peu d'impuretés.
15	Cadran d'instrument	Alliage complexe contenant beaucoup de Si.
16	Cadran d'instrument	Alliage complexe contenant beaucoup de Sn.
17	Contacteur à clé	Alliage complexe contenant beaucoup de Pb.
19.1 et 19.2	Réservoir secondaire	Objet en deux parties de composition similaire. L'une altérée contient un peu de Sn.
26	Plaque de zinc	Zn pur.
27	Lingot de zamak	Alliage Zn-Al-Cu contenant beaucoup d'Al, de Cu et peu d'impuretés.

3.2 Analyses DiscoveryMat

Les résultats présentés ci-après représentent une sélection de tracés indiquant les tendances observées lors des analyses selon les trois différentes solutions. Pour certains objets, il fut compliqué d'obtenir des tracés reproductibles. Dans certains, le tracé retenu est peu objectif et mériterait de plus longues investigations pour confirmer la tendance (*fig. 32 et 33*). Le tableau 12 indique la fiabilité de ces tracés retenus.

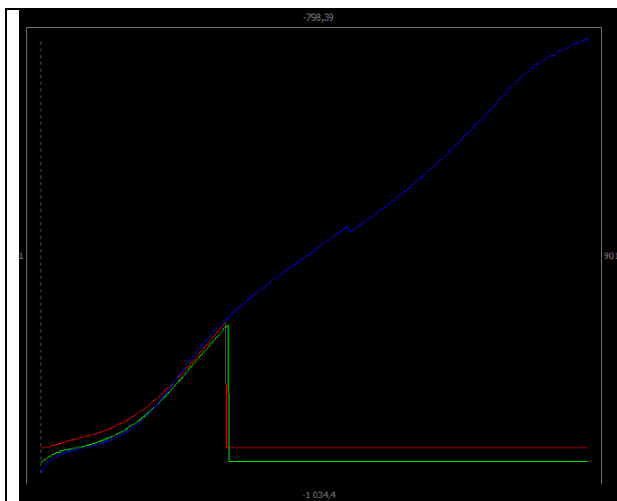


Fig. 32 : exemple de tendance claire sur DiscoveryMat

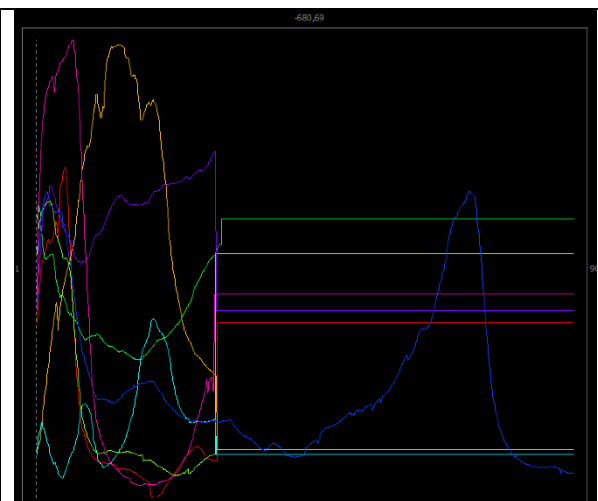
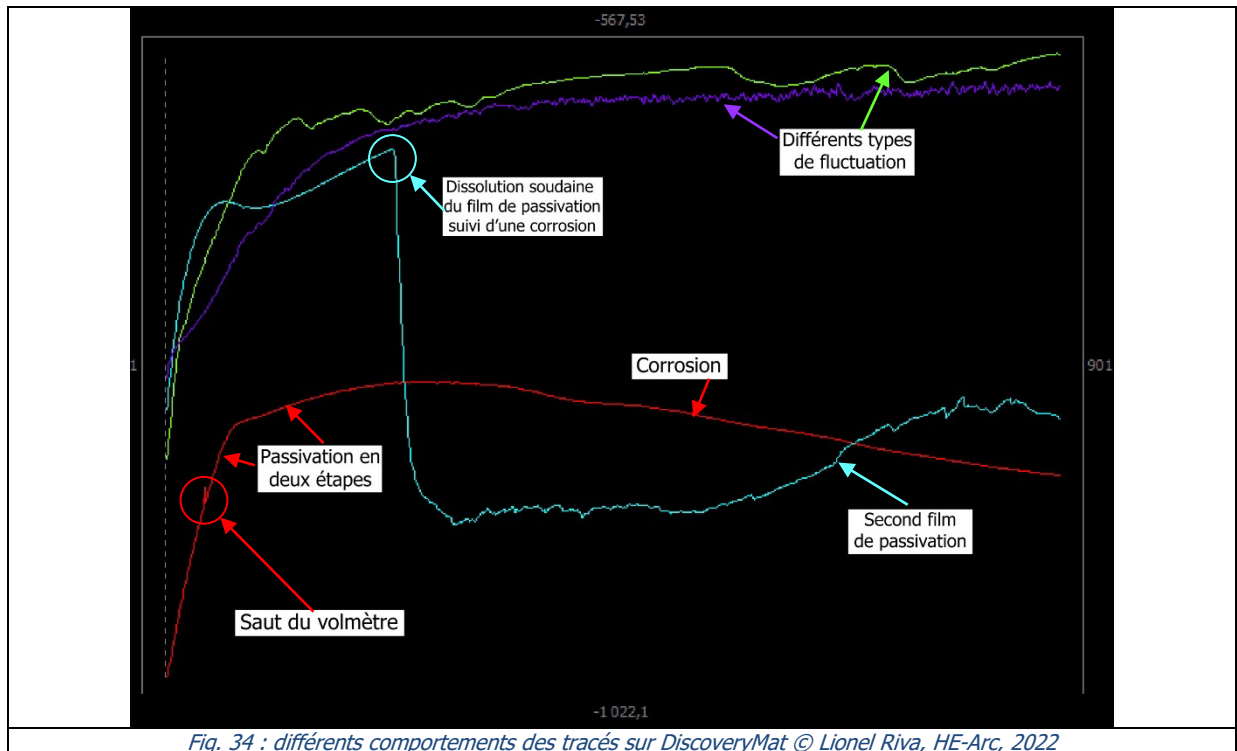


Fig. 33 : exemple de tendance pas claire sur DiscoveryMat

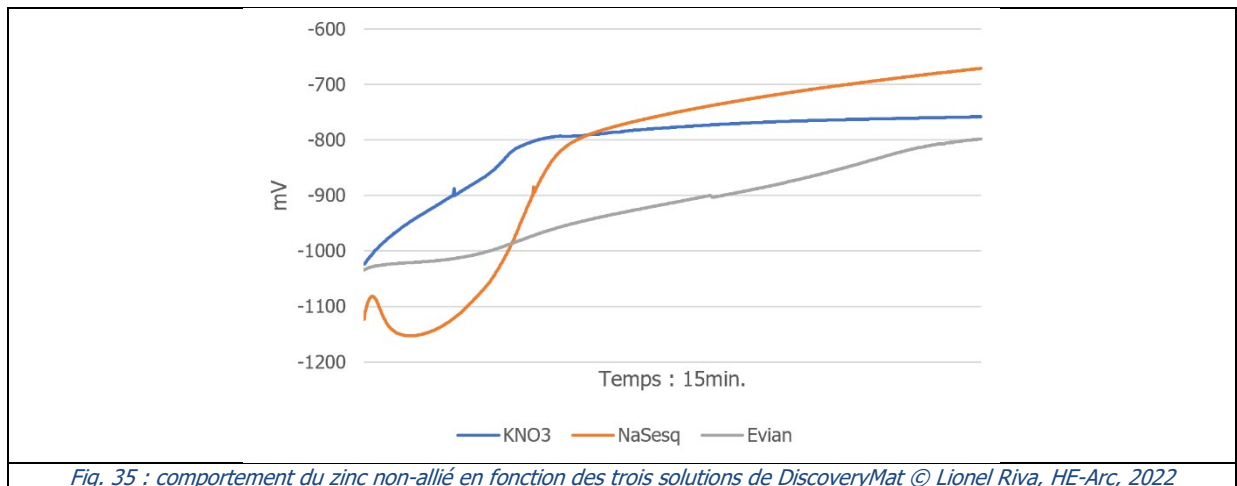
Tableau 12 : fiabilité des différentes mesures DiscoveryMat

N° objet	Nature de l'alliage	KNO ₃	NaSesq	Eau Evian	Page annexes
5	Zn-Al-Cu-Si	moyenne	moyenne	moyenne	40
13	Zn-Al	bonne	bonne	moyenne	40
15	Alliage complexe	moyenne	mauvaise	moyenne	41
16	Alliage complexe	moyenne	moyenne	moyenne	41
17	Alliage complexe	bonne	moyenne	moyenne	42
19.1	Alliage complexe	bonne	moyenne	bonne	42
19.2	Alliage complexe	bonne	moyenne	moyenne	43
27	Zn	bonne	bonne	bonne	43
28	Zn-Al-Cu	bonne	bonne	bonne	44

Le tracé peut avoir différents comportements (*fig. 34*). Lorsqu'il croît, on observe une passivation de la surface alors que lorsqu'il décroît, elle se corrode. Certains tracés présentent également des fluctuations, il s'agit d'un comportement propre aux matériaux. Finalement, il peut arriver que le tracé forme un saut brutal qui est lié au fonctionnement du voltmètre et qui intervient toujours vers environ -900mV. On entend d'ailleurs un petit « clac » caractéristique provenant de l'appareil.



Les analyses de la plaque de Zn non-allié (objet 26) présente un comportement qui confirme sa bonne résistance à la corrosion (fig. 35). On observe tout de même un comportement différent en fonction des différentes solutions au pH différents. NaSesq, la plus acide provoque en premier lieu une légère phase de corrosion qui permet la formation ultérieure d'un important film de passivation alors que l'eau Evian et KNO₃, plutôt neutres, en forme un directement.



Sur la base de l'observation du comportement du zinc non-allié, non pouvons comparer celui de ses alliages de différentes natures dans les tableaux 13, 14 et 15 suivants.

Tableau 13 : comportement dans KNO_3

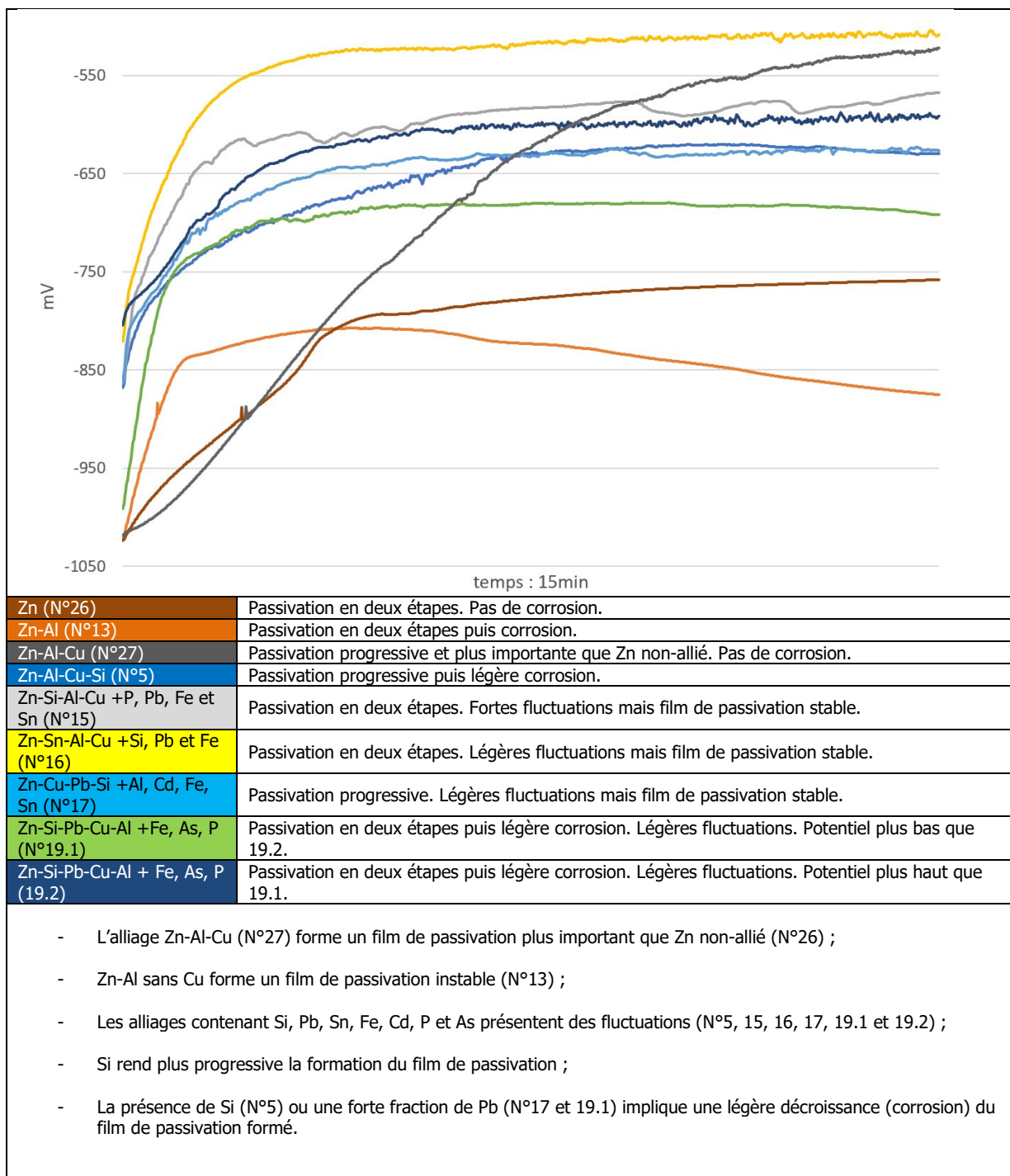


Tableau 14 : comportement dans NaSesq

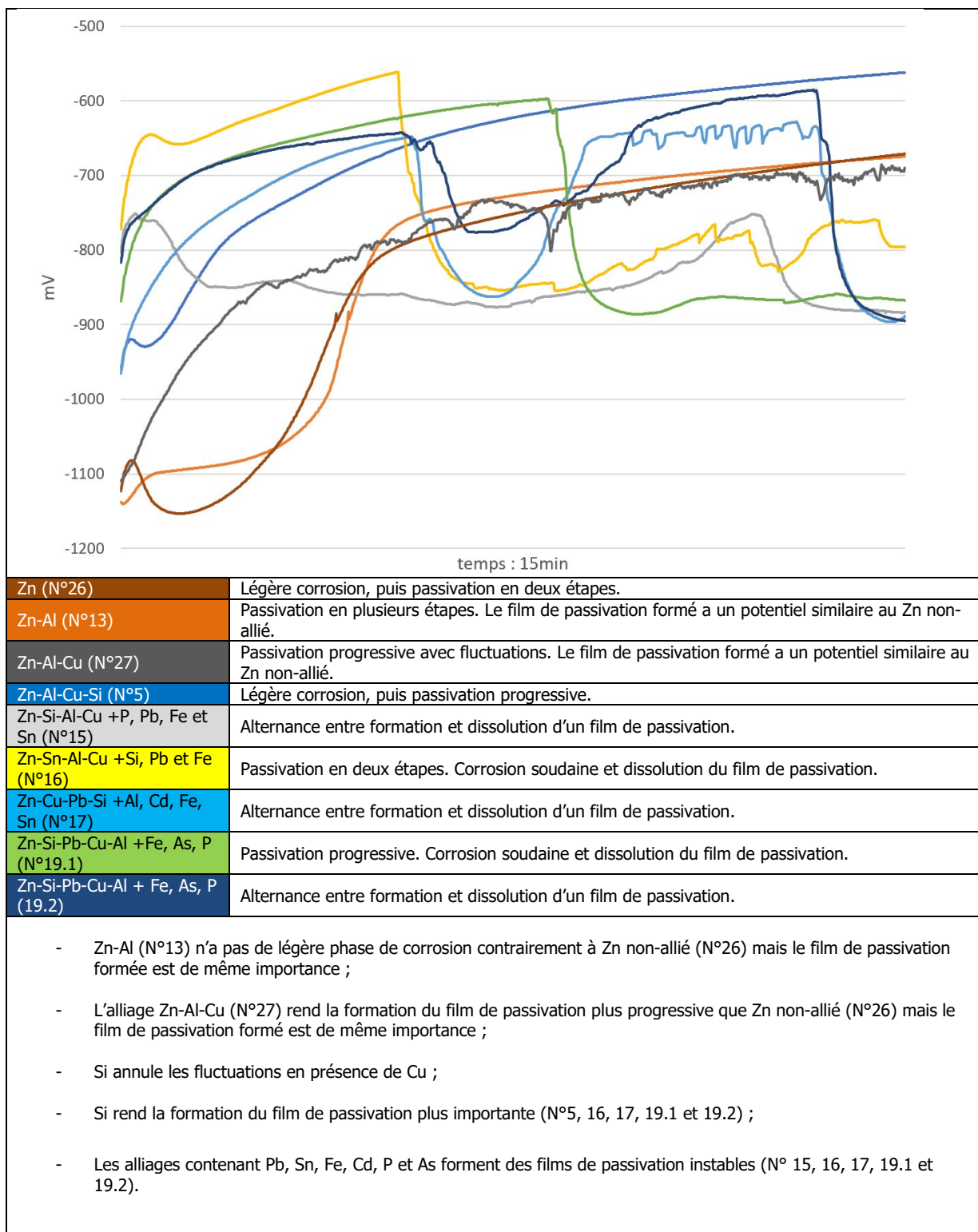
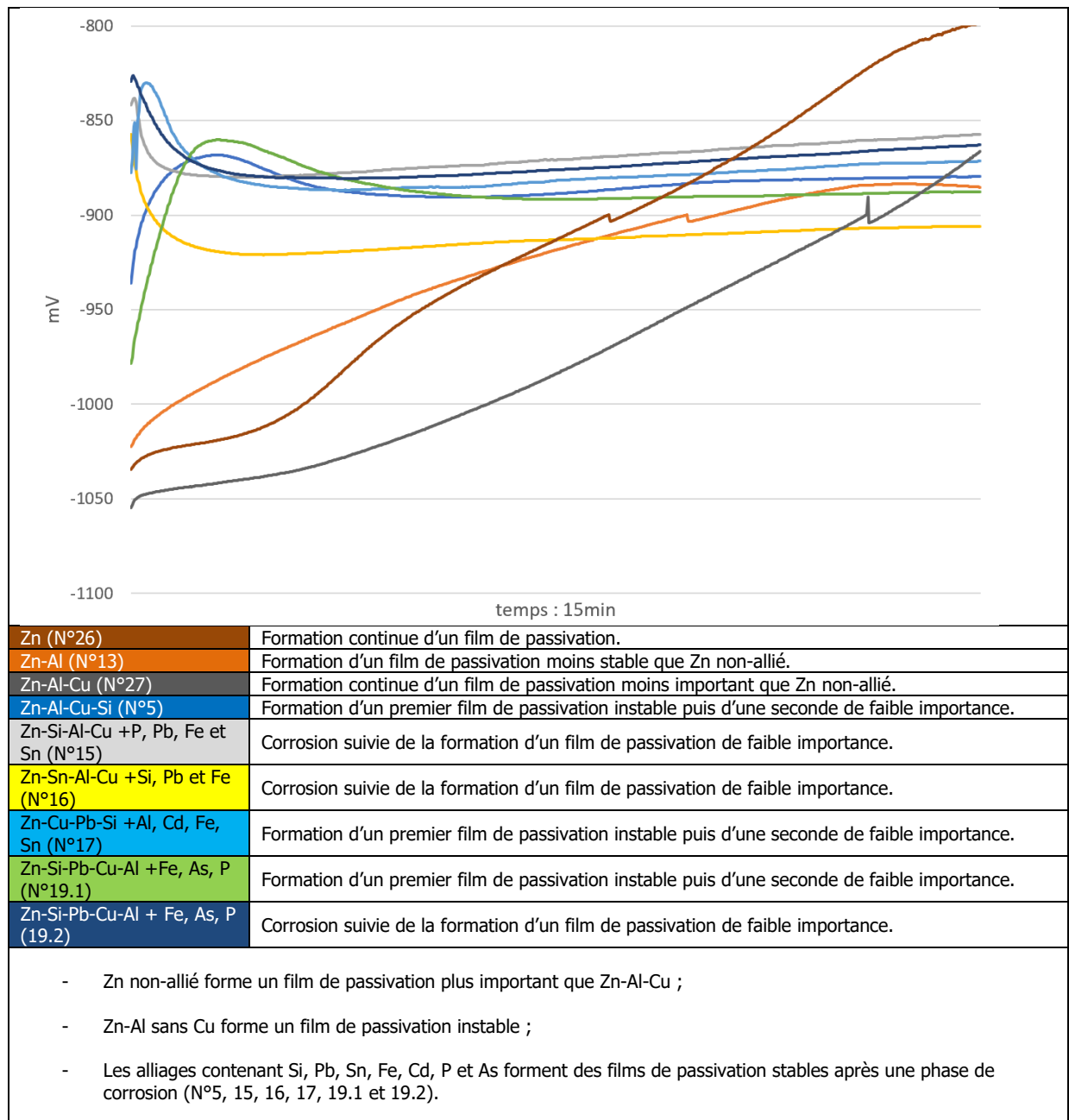


Tableau 15 : comportement dans eau Evian



4. Discussion des résultats

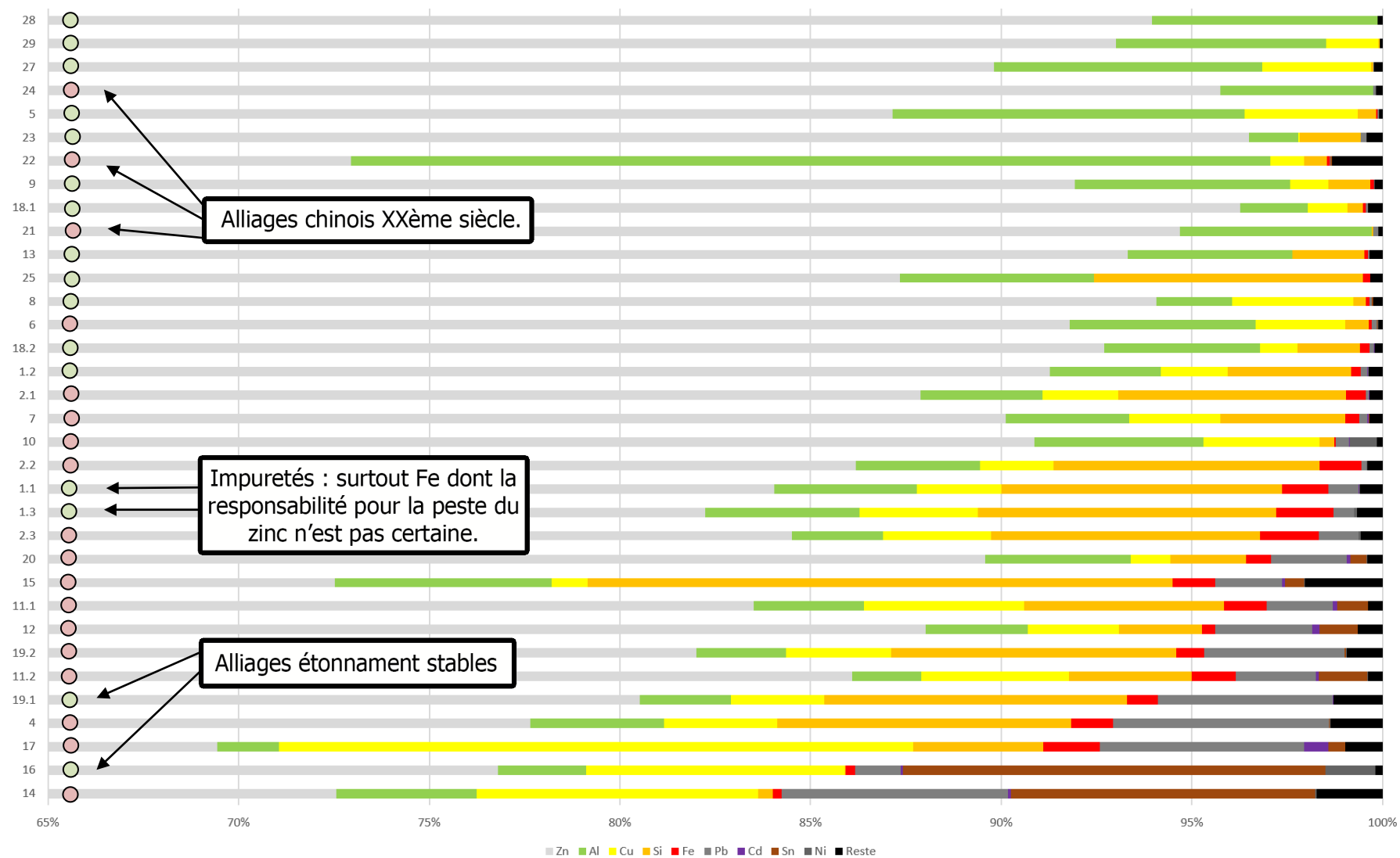
4.1 Composition des alliages de zinc : théorie et réalité

La FRX nous a révélé que les alliages de zinc analysés sont très variés alors que nous nous attendions plutôt à observer une tendance aux alliages Zn-Al-Cu contenant peu d'impuretés. L'état de l'art indiquait en revanche que nous aurions pu faire ce genre d'observations sur des objets antérieurs aux années 1920 lors des balbutiements des alliages à base de zinc qui permettaient théoriquement la fabrication de grandes séries de pièces complexes via le moulage sous pression. Cela étant d'autant plus probable du fait qu'en 1926, on déposât un brevet pour le zamak, le premier alliage de zinc stable, qui fut à priori rapidement adopté dans le monde occidental. La documentation des années 1930-1940⁷⁰ indiquait également l'effet néfaste de certaines impuretés telles que Pb, Sn, Fe ou encore Cd dans les alliages de zinc, or les objets de notre corpus de ces années-là en comportent beaucoup. Ce qui est d'autant plus étonnant, c'est que ces altérations pouvaient se développer très rapidement. On peut se demander si les industriels de l'époque avaient malgré tout conscience de la mauvaise facture de leurs alliages et que rien ne fut fait pour des questions de rendement jusque dans les années 1950 où ce phénomène tend à disparaître. En ce qui concerne les cas de peste du zinc sur les modèles réduits du XX^{ème} siècle, les parts d'impuretés ne dépassent pas celles sur les pièces automobiles anciennes du MNAM qui ne sont pas altérées. Il est difficile, sur la base de ces analyses, de comprendre pourquoi.

L'histogramme suivant (*fig. 35, p. 38*) confirme la tendance à l'altération en fonction de la quantité d'impuretés contenues dans les alliages à quelques exceptions près (objets 1, 16 et 19). Les pastilles vertes indiquent les objets non-altérés et à l'inverse, les pastilles rouges signalent le cas de peste du zinc. Nos analyses confirment également que Si ne semble pas avoir de rôle quant au développement de la peste du zinc, c'est pourquoi il n'est pas compris dans la part d'impuretés qui permet d'effectuer ce classement.

⁷⁰ Curts, 1930 ; Bally, 1937 ; Hütte, 1947

Fig. 35 : classement des objets selon leur composition en histogramme © Lionel Riva, HE-Arc, 2022



4.2 Usage de DiscoveryMat pour l'identification des alliages de zinc

Nos résultats démontrent que l'identification par voie électrochimique des alliages de zinc fonctionne. Le zinc seul se différencie assez facilement de ces alliages car Al, Cu et Si influent la formation du film de passivation. Déterminer la présence d'autres éléments semble également possible en raison des fluctuations qu'ils impliquent dans KNO_3 mais d'autres mesures sur un corpus de matériaux élargi permettraient de le confirmer. En revanche, il semble plus difficile de déterminer plus précisément leur nature exacte ainsi que leur rôle dans les propriétés de l'alliage du fait qu'il est impossible, en fonction des mesures effectuées, de différencier les objets atteints ou non de la peste du zinc. En effet, la formation ou la dissolution des films de passivation est à priori indépendante de la corrosion intergranulaire.

L'usage de DiscoveryMat en contexte patrimonial demeure malgré tout légitime à condition de disposer d'une base de données enrichie car les différents alliages se distinguent clairement lorsqu'on les compare. Cependant, si nous prenons en considération le fait que la reproductibilité des tracés de certains alliages était moyenne, voir mauvaise surtout pour les alliages complexes à forte teneur en Pb ou Sn par exemple, il faudrait dans un premier temps compléter la base de données avec des alliages binaires ou ternaires dont les éléments d'addition Al, Cu et Si.

Finalement, pour présenter ces résultats en plus du fait que bon nombre d'entre eux ne représentent pas des comportements parfaitement fiables, il aura fallu beaucoup de temps. Si certains tracés propres à une solution ont pu être effectués après les trois mesures de 5 minutes minimales, d'autres en ont nécessité des dizaines. Ainsi, pour ces 9 objets, il aura fallu environ 190 mesures impliquant chaque fois le polissage, le rinçage et la remise en place des objets sur l'installation, soit un total d'environ 160 heures incluant la formation à l'outil. Bien que le protocole soit à la portée de tout collaborateur en conservation-restauration, l'expérience quant à la rigueur et la rapidité des manipulations est un facteur important d'efficacité.

Conclusion

Au terme de cette étude focalisée sur la caractérisation des alliages de zinc que l'on peut trouver en contexte patrimonial, en l'occurrence dans le domaine des véhicules anciens, nous pouvons conclure que l'histoire des alliages à base de zinc est étroitement liée à celle de l'automobile. En effet, ces alliages du fait de leurs caractéristiques ont constitué une petite révolution qui aura influencé le développement de pièces mécaniques en raison d'un coût de production réduit et des possibilités qu'offrait la coulée sous pression. La vaste diversité de la composition des objets analysés témoigne d'une certaine manière que depuis ces débuts jusque dans les années 1950, la technique n'était pas véritablement aboutie, ce qui n'a pas toujours facilité l'interprétation des résultats. En effet, des exemples d'objets dont la théorie ne prédisait pas de durée dans le temps sont demeurés stables après près d'un siècle. Comme la peste du zinc est un phénomène qui se développe plus ou moins rapidement, il y a fort à parier que ces cas isolés d'objets dont l'intégrité fut conservée ne sont pas directement menacés. Cette étude pourrait être complétée par des analyses d'un corpus d'objets similaires à celui du MNAM mais datant de la seconde moitié XX^{ème} siècle afin d'observer s'il y a une tendance à l'uniformisation des compositions comme elles sont mentionnées dans la littérature actuelle d'ingénierie et de métallurgie. En revanche dans ce cas-là, nous sortirions un peu du domaine de la conservation-restauration car les alliages de zinc plus récents que ceux étudiés, comme les zamaks, ont une excellente tenue dans le temps.

Cette étude devait également permettre de constituer les premières entrées relatives aux alliages de zinc sur la base de données DiscoveryMat, objectif qui fut atteint du fait que l'outil s'est montré performant avec le zinc et ses alliages binaires et ternaires comme il le fut avec le cuivre et l'aluminium. On note cependant que l'identification est plus compliquée avec les alliages complexes à base de zinc qui contiennent d'autres éléments que Zn, Al et Cu à hauteur de plus d'1% et que cela requiert par conséquent davantage de recherche.

Bibliographie

- AFNOR. « Zinc et alliages de zinc, alliages pour fonderie, lingots et liquide ». NF EN 1774, 1997.
- Bally, Jacques. « Aluminium-Zinc ». In *Revue de l'aluminium et de ses applications*, N°96, 1937, pp. 971-979.
- Barklay, Roberts L. *et al.* « Le soin des objets métalliques ». Institut Canadien de Conservation, 2021.
- Brambilla, Laura *et al.* « Diagnostic and monitoring of historical vehicle engines by acoustic emission testing ». In *Metall 2019, 9th interim meeting of the ICOM-CC metals working group*. HE-Arc, Neuchâtel, 2019.
- Circular Bureau of Standards N°395 : Zinc and its Alloys. U.S. Department of Commerce, Washington, 1931.
- Colombié, Michel *et al.* *Matériaux métalliques*. Deuxième édition, Dunod, Paris, 2008. L'usine nouvelle, série matériaux.
- Cornet, Alain et Hlawka Françoise. *Science des matériaux : métallurgie mécanique, du microscopique ou macroscopique*. Ellipses Édition Marketing, Paris, 2006. Technosup, les filières technologiques des enseignements supérieurs.
- Degrigny, Christian. « Construction d'un logiciel d'analyse des métaux historiques à partir de leurs tracés électrochimiques. Validation de l'outil d'analyse sur une collection d'objets techniques, scientifiques et horlogers ». HE-Arc, Neuchâtel, 2012.
- Despland, Chloé. « Identification des alliages d'aluminium d'objets ethnographiques et caractérisation de leurs produits de corrosion : analyse par voie électrochimique et pas fluorescence X. » Travail de bachelor en conservation-restauration, HE-Arc, Neuchâtel, 2018.
- Doridot, Aurore et al. « Production expérimentale de laiton par cémentation en creuset ouvert, avec du minerai de zinc, selon les recettes médiévales et modernes ». *Archéosciences, revue d'archéométrie*, N°30, 2006, pp. 15-24.
- Dour, Gilles. *Aide-mémoire : fonderie, alliages, procédés, propriétés d'usage, défauts*. Deuxième éditions, Dunod, Paris, 2009.
- Encyclopedia Britannica [en ligne]. Die-casting, industrial process [consulté le 08.07.2022].
<https://www.britannica.com/technology/investment-casting> .
- Granget, Elodie. « Corrosion des alliages d'aluminium des circuits de refroidissement à eau de véhicules en contexte patrimonial : diagnostic à l'aide d'outils d'analyse portables et en libre accès sur un corpus de véhicules conservés au Musée National de l'Automobile de Mulhouse

- (Collection Schlumpf) ». Travail de master en conservation-restauration des objets scientifiques, techniques et horlogers, HE-Arc, Neuchâtel, 2020.
- Habashi, Fathi. *Discovering the 8th Metal : a History of Zinc*. International zinc association. Laval, 2002, *non-publié*.
- Hütte, société académique. *Manuel de l'ingénieur*. Traduction de la 27^{ème} édition allemande, Librairie Polytechnique Ch. Béranger, Paris, 1947.
- Muller, Jacques. *Formulaire technique de mécanique générale*. 17^{ème} édition, Imprimerie F. Paillard, Abbeville, 1977.
- Les alliages de zinc de A à Z. Éditions techniques des industries de la fonderie, Istres, 2009.
- Pétin, Jérôme. *Influence des éléments sur les alliages de zinc*. Cours donné à l'ESFF. Sièvres, 2022, *non publié*.
- Pola, Annalisa et al. « Review of Microstructures and Properties of Zinc Alloys ». *Metals*, N°10, 2020, pp. 253-269.
- Polmear, Ian. *Light Alloys : from traditionnal alloys to nanocrystals*. Quatrième édition, Elsevier, Amsterdam, 2006.
- Rabeisen, Elisabeth et al. « L'artisanat des alliages cuivreux à l'époque romaine : témoignages d'une production métallurgique à Javols-Anderitum (Lozère) ». *Revue archéologique de Narbonnaise*, tome 43, 2011, pp. 339-368.
- Rheinzink [en ligne]. [Consulté le 08.07.2022]. <https://www.rheinzink.ch/fr/produits/materiau-surfaces/zinc-titane/> .
- Russel, Alan M. et Lee, Kok Loong. *Structural-property relations in nonferrous metals*. Wiley, Hoboken, 2005.
- Schönnenbeck, Marianne et Neumann, Franck. « Geschichte des Zink, seine Herstellung und sein Anwendung ». *Baumetall*, volume 1, 2004, pp. 42-47.
- Tabariès de Grandsaignes, Antoine-Edouard. « Présence du zinc dans des bronzes réputés préhistoriques ». *Bulletin de la Société préhistorique française*, tome 4, volume 1, 1907, pp. 66-71.
- Vignes, Alain. *Métallurgie extractive : opérations, procédés et filières d'élaboration*. Volume 3. Lavoisier, Paris, 2009.
- VMZinc [en ligne]. [Consulté le 08.07.2022]. <https://www.v zinc.ch/fr/zinc-aspect/zinc-titane.html> .

Liste des figures et tableaux

Figures		
N°	Titre	Page
1	Calamine © Wikipédia, 2022	7
2	Creuset pour la fabrication du laiton par cémentation © Doridot, 2006, p. 20	7
3	Gouttière de toit du château de Germolle (XIX-XX ^{ème} siècle) © Christian Degriigny, 2022	9
4	Toiture en alliage Zn-Ti © rheinzink.ch	9
5	Four belge pour l'extraction du zinc © Wikiwand, 2022	10
6	Fonctionnement de l'extraction du zinc selon l'Imperial Smelting Process © Vignes, 2009, p. 132	10
7	Expérience démontrant les effets de l'étain sur des barres d'alliages de zinc après 60 jours (HR. 100%, T. 70°C) © Curts	12
8	Diagramme de phase Zn-Al © Pola, 2020, p. 3	12
9	Evolution des matériaux d'un carburateur Dell'Orto	14
10	Collier des flacons de parfums Dior en zamak avec revêtement de surface © experience-zamak.fr	14
11	Schéma ancien du moulage par injection sous pression © Hütte, 1947, p. 979	15
12	Schéma moderne du moulage par injection sous pression © Les alliages de zinc de A à Z, 2009, p. 107	15
13	Base de cric ; carter d'essuie-glace ; cuve de carburateur ; poignée de porte ; couvercle de pompe à essence ; motif de radiateur ; poignées de porte ; bâti de delco ; corps de carburateur ; bâti de compteur © Revue de l'aluminium, 1937, p. 978	15
14	Carburateur Dell'Orto de Piaggio Vespa VBB (1961) © Kyle's Scooter Shop	17
15	Modèle réduit couvert de craquelures © Lionel Riva, HE-Arc, 2022	17
16	Modèle réduit disloqué au transport dans sa boîte d'origine © ferrari-modelisme.com	17
17	Bague inuit de fouille archéologique en zinc © alaskawhitestuff.com	19
18	Tôle galvanisée corrodée © steelfabservice.com, 2022	19
19	Fine couche de produits de corrosion blancs sur alliage Zn-Sn-Cu-Al	19
20	Concrétions de produits de corrosion blancs sur alliage complexe à base de zinc	19
21	Alliage Zn-Al (4%) – Cu (3%) – Mg (0,1%) contenant 0,085% de Pb+Cd ainsi que 0,01% de Sn © Curts, 1930, p. 615	19
22	Klaxon de Fiat 509 du MNAM en laiton atteint de la crique saisonnière	19
23	Représentation des pièces observées sur un véhicule au MNAM	20
24	Analyse de l'objet N°21 avec l'ancien appareil © Christian Degriigny, HE-Arc, 2022	26
25	Nouvel appareil Niton™ XL5t © thermofischer.com	26
26	Analyse de l'objet N°21 avec le nouvel appareil © Christian Degriigny, HE-Arc, 2022	26
27	Mise en situation d'une mesure FRX	26
28	Installation schématisée de l'outil DiscoveryMat	27
29	Installation de l'outil DiscoveryMat	27
30	Exemple de polissage effectué sur une surface non-visible au montage de la pièce © Lionel Riva, HE-Arc, 2022	28
31	Exemple de polissage effectué avec l'outil artisanal	28
32	Exemple de tendance claire sur DiscoveryMat	33
33	Exemple de tendance pas claire sur DiscoveryMat	33
34	Différents comportements des tracés sur DiscoveryMat	34
35	Classement des objets selon leur composition en histogramme	39
Tableaux		
1	Désignation et composition chimique en pourcentage des pièces moulées en alliages de zinc normalisés © Colombié, 2008, p. 609	13
2	Description des altérations de la peste du zinc	18
3	Véhicules exposés concernés par la peste du zinc	21
4	Corpus d'objets du MNAM	22
5	Corpus d'objets non-patrimoniaux	24
6	Exemple de constat d'état sans peste du zinc	30
7	Exemple de constat d'état avec peste du zinc	30
8	Synthèse des constats d'état	31
9	Rôle d'Al et Cu dans les alliages analysés	32

10	Rôle des autres métaux dans les alliages analysés	32
11	Corpus d'objets pour analyses DiscoveryMat	33
12	Fiabilité des différentes mesures DiscoveryMat	33
13	Comportement dans KNO_3	35
14	Comportement dans NaSesq	36
15	Comportement dans eau Evian	37

Lexique

Carburateur : pièce permettant de mélanger et nébuliser un mélange d'air et d'essence dans le moteur pour provoquer une explosion.

Distributeur / delco : pièce rotative donnant l'impulsion électrique par cylindre par tour de moteur pour former les étincelles nécessaires à l'explosion du mélange air / essence.

Ductilité : capacité d'étirement.

Emboutissage : déformation d'une plaque de métal sous presse pour obtenir des formes.

Electrolytique : du principe d'électrolyse qui permet d'effectuer des actions chimiques avec un courant électrique. Permet de réduire ou d'oxyder des métaux.

Fatigue : fragilisation de la structure du métal après des contraintes mécaniques répétées.

Fluage : déformation naturelle du métal sous son propre poids.

Annexes

La peste du zinc en milieu patrimonial : caractérisation des alliages de zinc et étude de cas au Musée National de l'Automobile de Mulhouse

Mémoire présenté par :

Lionel Riva

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation
Objets scientifiques, techniques et horlogers

Année académique 2021-2022

Remise du travail : 18.07.2022

Jury : 23.08.2022

Nombre de pages : 44

Table des matières

Liste des illustrations	2
1. Illustrations	1
2. Constats d'état	24
3. Mesures DiscoveryMat	40

Liste des illustrations

Figures		
N°	Titre	Page
1	Peste du zinc sur carburateur Fiat 509	1
2	Peste du zinc sur poignées extérieures Fiat 509	1
3	Peste du zinc sur poignées intérieures Ballot Type RH3	1
4	Peste du zinc sur poignées intérieures Delage Type D6-11	1
5	Peste du zinc sur poignées extérieures Bugatti Type 46S	2
6	Peste du zinc sur garniture d'élément de tableau de bord Bugatti Type 46S	2
7	Peste du zinc sur garniture de radiateur Citroën 7A	2
8	Peste du zinc sur commandes de tableau de bord Bugatti Type 57C	2
9	Peste du zinc sur poignées de capot Bugatti Type 57C	3
10 et 11	Vues d'ensemble de l'objet N°1	3
12 à 14	Vues d'ensemble de l'objet N°2	3
15 à 17	Vues d'ensemble de l'objet N°3	4
18 et 19	Vues d'ensemble de l'objet N°4	4
20 à 22	Vues d'ensemble de l'objet N°5	4
23 à 25	Vues d'ensemble de l'objet N°6	4
26 à 28	Vues d'ensemble de l'objet N°7	5
29 et 30	Vues d'ensemble de l'objet N°8	5
31 et 32	Vues d'ensemble de l'objet N°9	5
33 et 34	Vues d'ensemble de l'objet N°10	5
35 et 36	Vues d'ensemble de l'objet N°11	6
37 et 38	Vues d'ensemble de l'objet N°12	6
39 à 41	Vues d'ensemble de l'objet N°13	6
42 à 44	Vues d'ensemble de l'objet N°14	6
45 et 46	Vues d'ensemble de l'objet N°15	7
47 et 48	Vues d'ensemble de l'objet N°16	7
49 et 50	Vues d'ensemble de l'objet N°17	7
51 à 53	Vues d'ensemble de l'objet N°18	7
54 à 56	Vues d'ensemble de l'objet N°19	8
57 à 59	Vues d'ensemble de l'objet N°20	8
60 et 61	Vues d'ensemble de l'objet N°21	8
62 et 63	Vues d'ensemble de l'objet N°22	8
64	Vues d'ensemble de l'objet N°23	9
65 et 66	Vues d'ensemble de l'objet N°24	9
67	Vues d'ensemble de l'objet N°25	9
68	Vues d'ensemble de l'objet N°26	9
69	Vues d'ensemble de l'objet N°27	10
70	Vues d'ensemble de l'objet N°28	10
71	Vues d'ensemble de l'objet N°29	10
72 et 73	Vues d'ensemble de l'objet N°30	10
74	Fissures isolées sur la cuve de l'objet N°2	11
75	Fissures isolées sur le couvercle de l'objet N°2	11
76	Fissures transversales sur la pipe de l'objet N°2	11
77	Fissures transversales sur les angles de l'objet N°4	11
78	Réseau de fissures sur le corps du distributeur N°6	12
79	Fissures transversales et déformation sur la partie supérieure du distributeur N°6	12
80	Fissures transversales et déformation sur la partie supérieure du distributeur N°7	12
81	Réseau de fissures, déformations et lacunes sur l'objet N°12	12
82	Fissure transversale sur l'angle interne et réseau de fissures sur l'ensemble de l'objet N°14	13
83	Réseau de fissures sur l'ensemble de la partie en alliage de zinc de l'objet 17	13
84	Réseau de fissures impliquant d'importantes déformations sur l'ensemble de la partie 2 l'objet 19	13
85	Fissures transversale et lacunes sur l'extrémité des dents de l'objet 20	13
86	Réseau de fissures sur l'ensemble de l'objet 20	14
87	Réseau de microfissures supposé en raison des légères déformations sur toit et décollement du revêtement de surface sur le toit, le coffre et le côté gauche de l'objet 22	14
88	Réseau de microfissures suspecté en raison du gondollement de revêtement de surface de l'objet 24	14
89	Important réseau de fissures, pièces cassées sur les charnières des portes, du capot et du coffre de l'objet 24	14

1. Illustrations

Photographies des cas de peste du zinc sur les véhicules exposés

Fig. 1 : peste du zinc sur carburateur Fiat 509

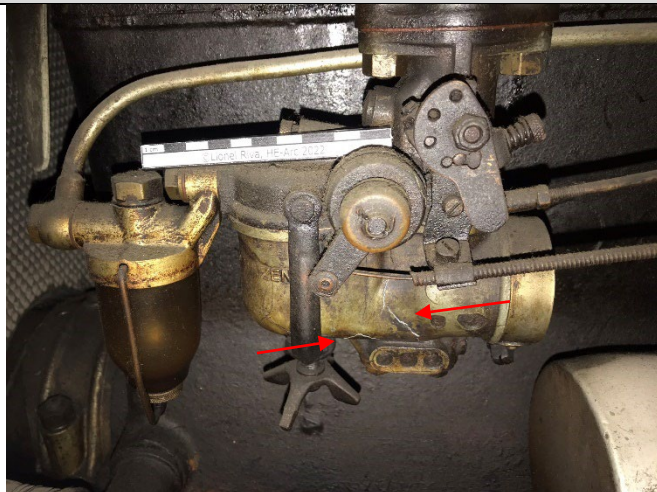


Fig. 2 : peste du zinc sur poignées extérieures Fiat 509



Fig. 3 : Peste du zinc sur poignées intérieures Ballot Type RH3

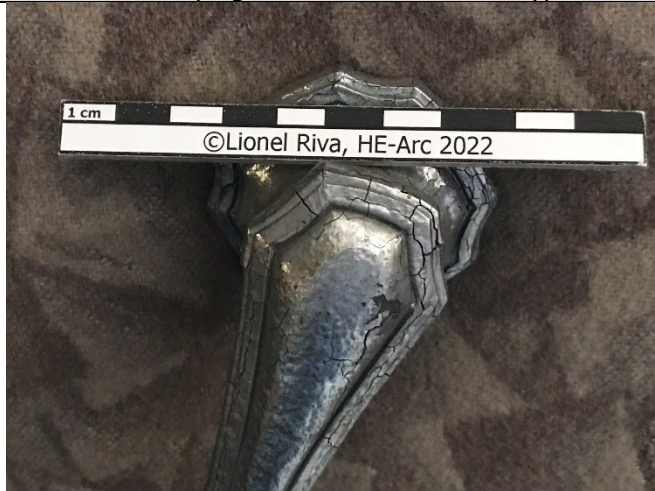


Fig. 4 : Peste du zinc sur poignées intérieures Delage Type D6-11



Fig. 5 : Peste du zinc sur poignées extérieures Bugatti Type 46S

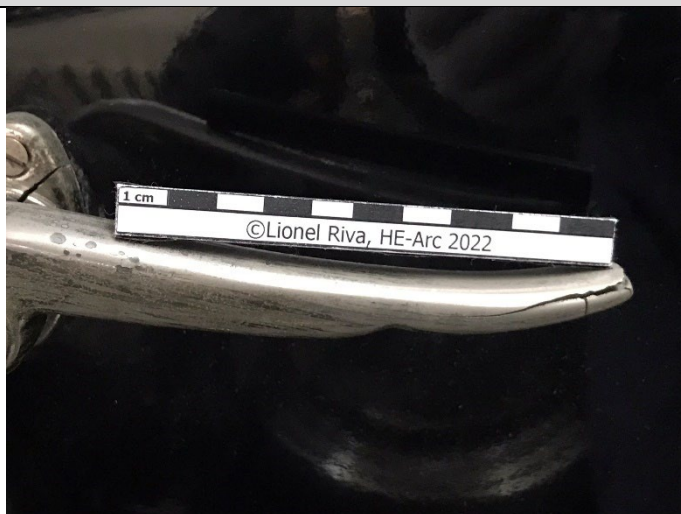


Fig. 6 : Peste du zinc sur garniture d'élément de tableau de bord Bugatti Type 46S



Fig. 7 : Peste du zinc sur garniture de radiateur Citroën 7A



Fig. 8 : Peste du zinc sur commandes de tableau de bord Bugatti Type 57C



Fig. 9 : Peste du zinc sur poignées de capot Bugatti Type 57C



Photographies des objets

Fig. 10 : vue d'ensemble de l'objet N°1



Fig. 11 : vue d'ensemble de l'objet N°1



Fig. 12 : vue d'ensemble de l'objet N°2



Fig. 13 : vue d'ensemble de l'objet N°2



Fig. 14 : vue d'ensemble de l'objet N°2



Fig. 15 : vue d'ensemble de l'objet N°3



Fig. 16 : vue d'ensemble de l'objet N°3



Fig. 17 : vue d'ensemble de l'objet N°3



Fig. 18 : vue d'ensemble de l'objet N°4



Fig. 19 : vue d'ensemble de l'objet N°4



Fig. 20 : vue d'ensemble de l'objet N°5



Fig. 21 : vue d'ensemble de l'objet N°5



Fig. 22 : vue d'ensemble de l'objet N°5



Fig. 23 : vue d'ensemble de l'objet N°6



Fig. 24 : vue d'ensemble de l'objet N°6



Fig. 25 : vue d'ensemble de l'objet N°6



Fig. 26 : vue d'ensemble de l'objet N°7



Fig. 27 : vue d'ensemble de l'objet N°7



Fig. 28 : vue d'ensemble de l'objet N°7



Fig. 29 : vue d'ensemble de l'objet N°8



Fig. 30 : vue d'ensemble de l'objet N°8



Fig. 31 : vue d'ensemble de l'objet N°9



Fig. 32 : vue d'ensemble de l'objet N°9



Fig. 33 : vue d'ensemble de l'objet N°10



Fig. 34 : vue d'ensemble de l'objet N°10



Fig. 35 : vue d'ensemble de l'objet N°11



Fig. 36 : vue d'ensemble de l'objet N°11



Fig. 37 : vue d'ensemble de l'objet N°12



Fig. 38 : vue d'ensemble de l'objet N°12



Fig. 39 : vue d'ensemble de l'objet N°13



Fig. 40 : vue d'ensemble de l'objet N°13



Fig. 41 : vue d'ensemble de l'objet N°13



Fig. 42 : vue d'ensemble de l'objet N°14



Fig. 43 : vue d'ensemble de l'objet N°14



Fig. 44 : vue d'ensemble de l'objet N°14



Fig. 45 : vue d'ensemble de l'objet N°15



Fig. 46 : vue d'ensemble de l'objet N°15



Fig. 47 : vue d'ensemble de l'objet N°16



Fig. 48 : vue d'ensemble de l'objet N°16



Fig. 49 : vue d'ensemble de l'objet N°17



Fig. 50 : vue d'ensemble de l'objet N°17



Fig. 51 : vue d'ensemble de l'objet N°18



Fig. 52 : vue d'ensemble de l'objet N°18



Fig. 53 : vue d'ensemble de l'objet N°18



Fig. 54 : vue d'ensemble de l'objet N°19



Fig. 55 : vue d'ensemble de l'objet N°19



Fig. 56 : vue d'ensemble de l'objet N°19



Fig. 57 : vue d'ensemble de l'objet N°20



Fig. 58 : vue d'ensemble de l'objet N°1



Fig. 59 : vue d'ensemble de l'objet N°1



Fig. 60 : vue d'ensemble de l'objet N°21



Fig. 61 : vue d'ensemble de l'objet N°21



Fig. 62 : vue d'ensemble de l'objet N°22



Fig. 63 : vue d'ensemble de l'objet N°22



Fig. 64 : vue d'ensemble de l'objet N°23



Fig. 65 : vue d'ensemble de l'objet N°24



Fig. 66 : vue d'ensemble de l'objet N°24



Fig. 67 : vue d'ensemble de l'objet N°25



Fig. 68 : vue d'ensemble de l'objet N°26



Fig. 69 : vue d'ensemble de l'objet N°27



Fig. 70 : vue d'ensemble de l'objet N°28



Fig. 71 : vue d'ensemble de l'objet N°29



Fig. 72 : vue d'ensemble de l'objet N°30



Fig. 73 : vue d'ensemble de l'objet N°30



Gros plans sur les objets

Fig. 74 : fissures isolées sur la cuve de l'objet N°2



Fig. 75 : fissures isolées sur le couvercle de l'objet N°2



Fig. 76 : fissures transversales sur la pipe de l'objet N°2



Fig. 77 : fissures transversales sur les angles de l'objet N°4



Fig. 78 : réseau de fissures sur le corps du distributeur N°6



Fig. 79 : fissures transversales et déformation sur la partie supérieure du distributeur N°6



Fig. 80 : fissures transversales et déformation sur la partie supérieure du distributeur N°7

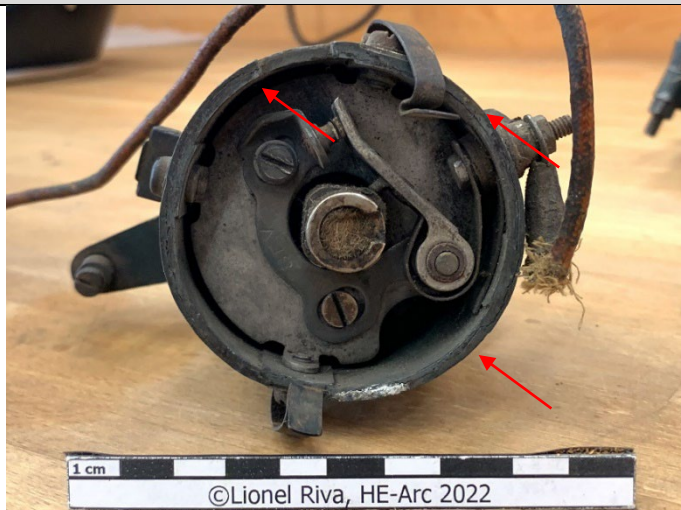


Fig. 81 : réseau de fissures, déformations et lacunes sur l'objet N°12



Fig. 82 : Fissure transversale sur l'angle interne et réseau de fissures sur l'ensemble de l'objet 14



Fig. 83 : réseau de fissures sur l'ensemble de la parte en alliage de zinc de l'objet 17



Fig. 84 : réseau de fissures impliquant d'importantes déformations sur l'ensemble de la partie 2 l'objet 19



Fig. 86 : réseau de fissures sur l'ensemble de l'objet 20

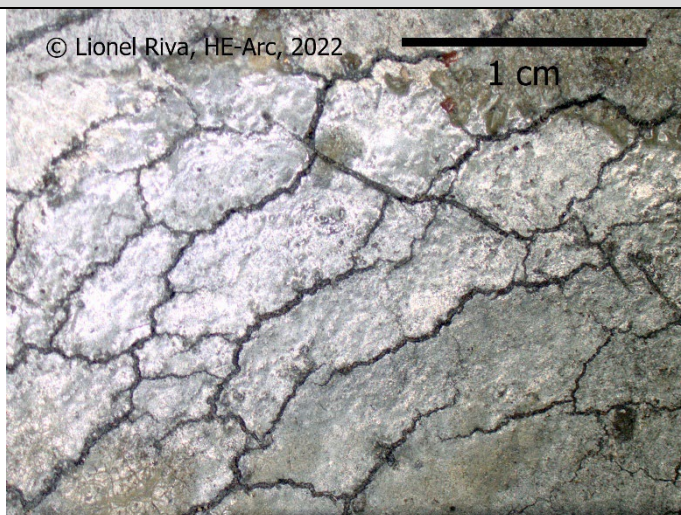


Fig. 85 : fissures transversale et lacunes sur l'extrémité des dents de l'objet 20



Fig. 87 : Réseau de microfissures supposé en raison des légères déformations sur toit et décollement du revêtement de surface sur le toit, le coffre et le côté gauche de l'objet 22



Fig. 88 : réseau de microfissures suspecté en raison du gonflement de revêtement de surface de l'objet 24

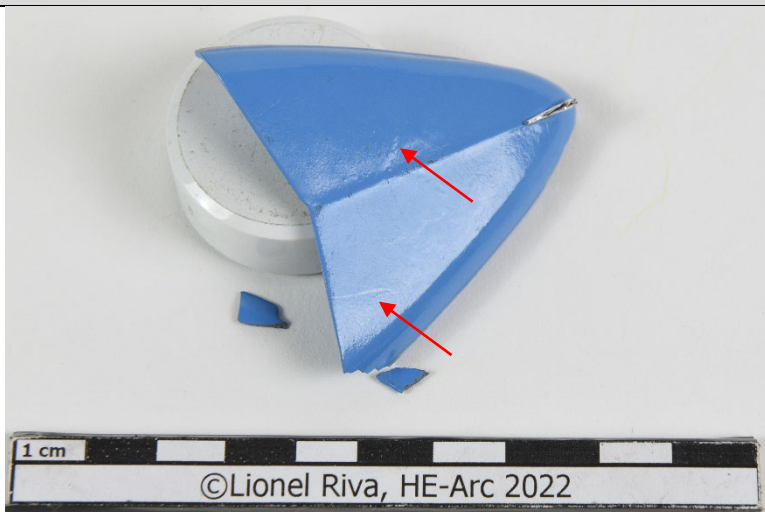
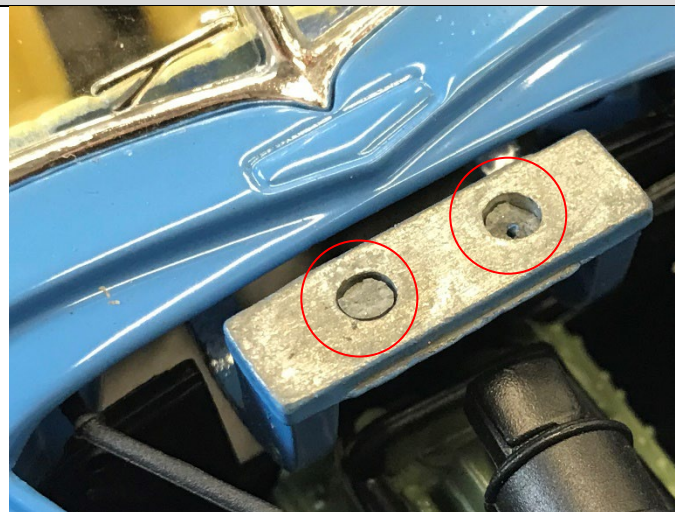
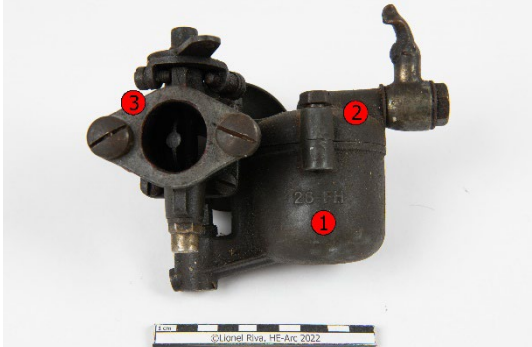


Fig.89 : important réseau de fissures, pièces cassées sur les charnières des portes, du capot et du coffre de l'objet 24



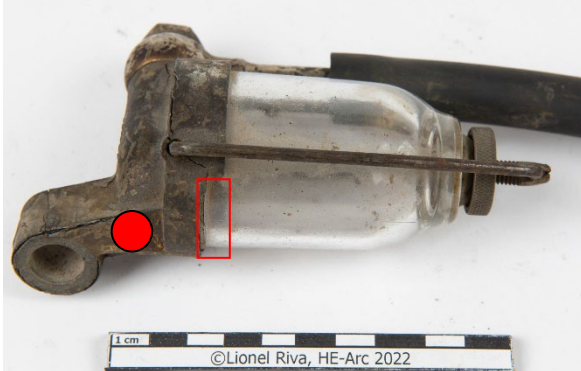
2. Constats d'état

Objet N°1 : Carburateur « Solex 26-FH »											Datation : ~1930-1940														
Illustration avec zones d'analyse FRX											Constat d'état visuel des altérations														
											L'objet présente un encrassement global et une odeur typique d'un compartiment moteur ¹ ainsi que des marques d'outils sur les éléments d'assemblage.														
Détermination de la nature des matériaux analysés																									
Composition en %																									
N°	Zn	Al	Cu	Si	Pb	Fe	Cd	Ni	P	As	V	Cr	Mn	Y	Zr	Ti	Bi								
1	87,9	3,2	2,0	6	0,1	0,5	<0,1	<0,1	0,2	-	<0,1	0,1	<0,1	-	-	-	-								
2	86,2	3,2	1,9	7	0,1	1,1	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	-	-	-	-								
3	84,5	2,4	2,8	7,1	1	1,5	-	0,1	0,3	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	-								
Type d'alliage																									
Alliage Zn-Si-Al-Cu. Les 3 parties ont proportions d'Al et Cu proches d'un zamak ZP2 ou ZP5. Toutefois, les zamaks ne contiennent que des traces de Si, contrairement à cet objet.																									
Diagnostic																									
Contraintes d'utilisation				L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.																					
Pas de peste du zinc																									

¹ Résidus noirs collants et mélange d'odeurs d'huiles et de combustibles pour véhicules

Objet N°2 : Carburateur « Solex 30-FH »											Datation : ~1930-1940							
Illustration avec zones d'analyse FRX											Constat d'état visuel des altérations							
											L'objet présente un encrassement global et une odeur typique d'un compartiment moteur ainsi que des marques d'outils sur les éléments d'assemblage. Partie 1 : fissures isolées sur la cuve (fig. 74, p.11) ; Partie 2 : fissures isolées sur le couvercle (fig. 75, p.11) ; Partie 3 : fissures transversales sur la pipe (fig. 76, p.11).							
Détermination de la nature des matériaux analysés																		
Composition en %																		
N°	Zn	Al	Cu	Si	Pb	Fe	Cd	Ni	P	As	V	Cr	Mn	Y	Zr	Ti	Bi	
1	84,0	3,7	2,2	7,4	0,8	1,2	<0,1	<0,1	0,4	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	
2	91,3	2,9	1,8	3,2	0,2	0,3	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	0,1	0,1	-	-	-	<0,1	-	
3	82,2	4	3,1	7,8	0,5	1,5	-	0,1	0,4	0,1	0,1	<0,1	<0,1	-	<0,1	-	<0,1	
Type d'alliage																		
Alliage Zn-Si-Al-Cu. Les 3 parties ont proportions d'Al et Cu proches d'un zamak ZP2 ou ZP5. Toutefois, les zamaks ne contiennent que des traces de Si, contrairement à cet objet.																		
Diagnostic																		
Contraintes d'utilisation				L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.														
Peste du zinc				Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Bien qu'ayant une composition similaire à l'objet N°1, il contient plus de plomb.														

Objet N°3 : Filtre à essence « Tecalemit »										Datation : ~1920-1930																			
Illustration avec zones d'analyse FRX										Constat d'état visuel des altérations																			
										L'objet présente un encrassement éparé et une odeur typique d'un compartiment moteur ainsi que des marques d'outils sur les éléments d'assemblage.																			
Détermination de la nature du matériau analysé																													
Composition en %																													
Cu	Si	Al	Fe	Zn	S	Pb	P	Sn	Cr	V	Bi	Mn	Zr	Y															
47	19,1	19	5,8	3,4	3	1,5	0,3	0,3	0,2	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1															
Type d'alliage																													
Alliage à base de cuivre → non retenu pour l'étude																													

Objet N°4 : Filtre à essence « Tecalemit » avec tuyau											Datation : ~1920-1930										
Illustration avec zones d'analyse FRX											Constat d'état visuel des altérations										
											L'objet présente un encrassement global et une odeur typique d'un compartiment moteur ainsi que des marques d'outils sur les éléments d'assemblage. Il y a des fissures transversales sur les angles provoquant de légères déformations (<i>fig. 77, p.11</i>) et des lacunes ().										
Détermination de la nature du matériau analysé																					
Composition en %																					
Zn	Si	Pb	Al	Cu	Fe	As	P	Bi	V	Cr	Ni	Sn	Mn	Y	Zr						
77,7	7,7	5,7	3,5	3	1,1	0,9	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1						
Type d'alliage																					
Alliage complexe à base de Zn non-identifié d'après la documentation consultée. Les proportions d'Al et Cu sont proches d'un zamak ZP2. Toutefois, les zamaks ne contiennent que des traces de Si et Pb, contrairement à cet objet.																					
Diagnostic																					
Contraintes d'utilisation				L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.																	
Peste du zinc				Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Cela peut être causé par la forte teneur en Pb ayant provoqué les fissures sur des zones plus sensibles à la suite de la coulée.																	

Objet N°5 : Distributeur / Delco « S.E.V. »												Datation : ~1920-1930							
Illustration avec zones d'analyse FRX						Constat d'état visuel des altérations													
						L'objet présente un encrassement à l'intérieur (zone lubrifiée) et une odeur typique d'un compartiment moteur ainsi que des marques d'outils sur les éléments d'assemblage.													
Détermination de la nature du matériau analysé																			
Composition en %																			
Zn	Al	Cu	Si	Cr	Fe	Pb	P	V	Bi	Mn	Ti								
87,1	9,2	3	0,5	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1								
Type d'alliage																			
Alliage Zn-Al-Cu dont les proportions ne correspondent pas à des alliages détaillés dans la documentation consultée. Leur fraction d'impuretés est toutefois plus faible que les deux autres distributeurs altérés.																			
Diagnostic																			
Contraintes d'utilisation		L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.																	
Pas de peste du zinc																			

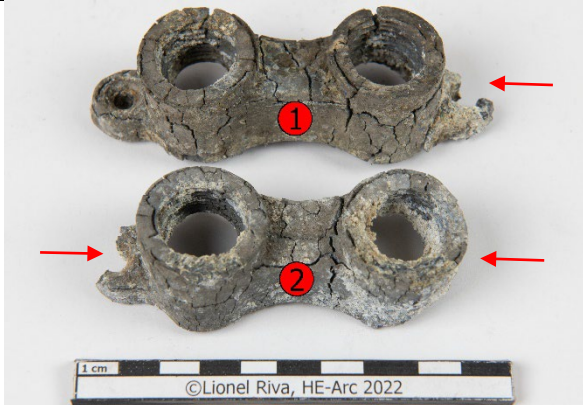
Objet N°6 : Distributeur / Delco « S.E.V. »							Datation : ~1920-1930						
Illustration avec zones d'analyse FRX							Constat d'état visuel des altérations						
							L'objet présente un encrassement à l'intérieur (zone lubrifiée), légèrement à l'extérieur et une odeur typique d'un compartiment moteur ainsi que des marques d'outils sur les éléments d'assemblage. Corps externe du distributeur : réseau de fissures légères (<i>fig. 78, p.12</i>) ; Section supérieure du distributeur : fissures transversales et déformation (<i>fig. 79, p.12</i>).						
Détermination de la nature du matériau analysé													
Composition en %													
Zn	Al	Cu	Si	Pb	Fe	Cr	P	Sn	V	Bi	Ni	Ti	Zr
91,8	4,9	2,3	0,6	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Type d'alliage													
Alliage Zn-Al-Cu. Les proportions d'Al et Cu sont proches d'un zamak ZP2 ou ZP5. Toutefois, les zamaks ne contiennent que des traces de Si, contrairement à cet objet.													
Diagnostic													
Contraintes d'utilisation		L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.											
Peste du zinc		Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Bien qu'ayant une composition similaire à l'objet N°1, il contient plus de plomb.											

Objet N°7 : Distributeur / Delco sans marque								Datation : ~1920-1930							
Illustration avec zones d'analyse FRX								Constat d'état visuel des altérations							
								L'objet présente un encrassement global et une odeur typique d'un compartiment moteur ainsi que des marques d'outils sur les éléments d'assemblage. Section supérieure du distributeur : fissures transversales (<i>fig. 80, p.12</i>).							
Détermination de la nature du matériau analysé															
Composition en %															
Zn	Si	Al	Cu	Fe	Pb	P	V	Cd	As	Cr	Sn	Bi	Ni	Y	
90,1	3,3	3,2	2,4	0,3	0,2	0,2	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Type d'alliage															
Alliage Zn-Al-Cu. Les proportions d'Al et Cu sont proches d'un zamak ZP2 ou ZP5. Toutefois, les zamaks ne contiennent que des traces de Si, contrairement à cet objet.															
Diagnostic															
Contraintes d'utilisation				L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.											
Peste du zinc															

Objet N°8 : Poignée de lève-vitre								Datation : ~1920-1950							
Illustration avec zones d'analyse FRX								Constat d'état visuel des altérations							
								Le revêtement de l'objet présente des traces de corrosion par piqûres.							
Détermination de la nature du matériau analysé															
Composition en %															
Zn	Cu	Al	Si	Fe	P	Pb	Sn	V	Sb	Te	Ti	Bi	Ni		
94,1	3,2	2	0,3	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
Type d'alliage															
Alliage Zn-Al-Cu. Les proportions d'Al et Cu ne correspondent pas à un type de zamak connu mais les quantités d'impuretés sont faibles (<0,1%).															
Diagnostic															
Contraintes d'utilisation		L'objet de l'habitacle du véhicule n'a pas subi de fortes variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc ont été soumises à des contraintes mécaniques (levier, par rotation).													
Pas de peste du zinc															

Objet N°9 : Poignée de porte					Datation : ~1920-1950						
Illustration avec zones d'analyse FRX					Constat d'état visuel des altérations						
					Le revêtement de l'objet a presque disparu.						
Détermination de la nature du matériau analysé											
Composition en %											
Zn	Al	Si	Cu	Cr	Fe	P	Ni	As	V	Pb	Ti
91,9	5,6	1,1	1	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Type d'alliage											
Alliage Zn-Al-Cu. Les proportions d'Al et Cu correspondent à un zamak de type ZP6 et les quantités d'impuretés sont faibles (<0,1%).											
Diagnostic											
Contraintes d'utilisation		L'objet potentiel externe ou interne du véhicule a subi des variations de températures naturelles. Les pièces de l'objet en alliage de zinc ont été soumises à des contraintes mécaniques (levier).									
Pas de peste du zinc											

Objet N°10 : poignée de porte intérieure							Datation : ~1920-1950						
Illustration avec zones d'analyse FRX							Constat d'état visuel des altérations						
							Sur toute la surface de l'objet : réseau de fissures impliquant des déformations en surface ; Sur la tranche de la zone de levier : lacune (○).						
Détermination de la nature du matériau analysé													
Composition en %													
Zn	Al	Cu	Ni	Si	Pb	Cr	V	P	Fe	Cd	Mn	Bi	
90,9	4,4	3	0,7*	0,4	0,4	0,1*	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
*une seconde analyse sur le revêtement indique 22,3 % de Ni et 7 % de Cr. Des traces de ce revêtement sur la zone d'analyse ci-dessus impliquent de considérer la valeur pour Ni et Cr à la baisse.													
Type d'alliage													
Alliage Zn-Al-Cu. Les proportions d'Al et Cu correspondent à un zamak de type ZP2 et mais il contient une certaine quantité de Pb.													
Diagnostic													
Contraintes d'utilisation		L'objet de l'habitacle du véhicule n'a pas subi de fortes variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc ont été soumises à des contraintes mécaniques (levier).											
Peste du zinc		Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. L'élément Pb qui en est vraisemblablement la cause n'a pas l'aire d'avoir été affecté par les contraintes mécaniques.											

Lot N°11 : portes bougies		Datation : ~1920-1940														
Illustration avec zones d'analyse FRX		Constat d'état visuel des altérations														
		Sur toute les surface des deux objets : réseau de fissures impliquant des déformations en surface ; Sur les points d'attache : lacunes (⚡) ; Sur l'ensemble des objets : déformation globale.														
Détermination de la nature du matériau analysé																
Composition en %																
N°	Zn	Si	Cu	Al	Pb	Fe	Sn	P	Cd	Sb	V	Bi	Mn	Y	Ni	Zr
1	83,5	5,2	4,2	2,9	1,8	1,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
2	86,1	3,2	3,9	1,8	2,1	1,1	1,3	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Type d'alliage																
Alliage Zn-Si-Al-Cu avec grande quantité de Pb, Fe et Sn. Les proportions d'Al et Cu ne correspondent pas à un zamak connu.																
Diagnostic																
Contraintes d'utilisation		L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été														

	soumises à des contraintes mécaniques.
Peste du zinc	Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Les éléments Pb, Fe et Sn en sont vraisemblablement la cause et les variations de température ont pu jouer un rôle. Le Sn a pu amplifier les déformations et sa combinaison avec Pb et Cd à contribuer la formation de produits de corrosion blancs.

Objet N°12 : porte bougie										Datation : ~1920-1940					
Illustration avec zones d'analyse FRX										Constat d'état visuel des altérations					
										Les parties fines et les angles : réseau de fissures impliquant des déformations et des lacunes (<i>fig. 81, p. 12</i>) ; Sur l'ensemble de l'objet : déformation globale.					
Détermination de la nature du matériau analysé															
Composition en %															
Zn	Al	Pb	Cu	Si	Sn	Fe	Sb	Cd	P	V	Cr	Bi	Y	Ni	Zr
88	2,5	2,5	2,4	2,2	1	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Type d'alliage															
Alliage complexe à base de Zn non-identifié d'après la documentation consultée. Il contient beaucoup d'éléments néfastes aux alliages de zinc.															
Diagnostic															
Contraintes d'utilisation				L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.											
Peste du zinc				Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Les élément Pb et Sn en sont vraisemblablement la cause et les variations de température ont pu jouer un rôle. Le Sn a pu amplifier les déformations.											

Objet N°13 : support d'ampoule « PK-LMP »						Datation : ~1950-1960					
Illustration avec zones d'analyse FRX						Constat d'état visuel des altérations					
						Aucune altération.					
©Lionel Riva, HE-Arc 2022											
Détermination de la nature du matériau analysé											
Composition en %											
Zn	Al	Si	P	Ti	Fe	Cr	Pb	V	Bi	Ni	
93,3	4,3	1,9	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Type d'alliage											
Alliage Zn-Al-Si. La proportion d'Al et l'absence de Cu est caractéristique des zamaks ZP3. Toutefois, les zamaks ne contiennent pas de Si.											
Diagnostic											
Contraintes d'utilisation		L'objet a subi des variations de température causées par l'échauffement de l'ampoule au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.									
Pas de peste du zinc											

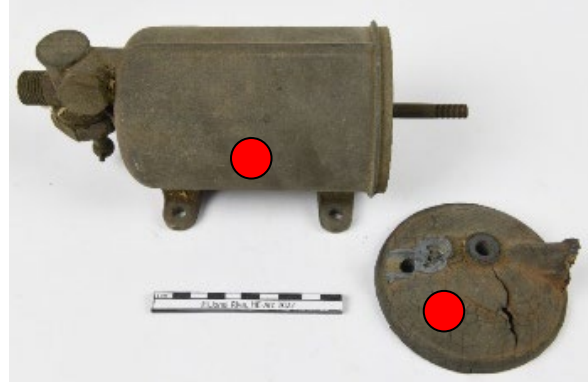
Objet N°14 : lampe de plafonnier										Datation : ~1920-1930									
Illustration avec zones d'analyse FRX										Constat d'état visuel des altérations									
										Sur les sections fines : fissures isolées (↗) impliquant des déformations et lacunes (○) ; Sur l'ensemble de l'objet : réseau de fissures léger et déformation globale Au dos : fine couche de produits de corrosion blancs (fig. 82, p. 13).									
Détermination de la nature du matériau analysé																			
Composition en %																			
Zn	Sn	Cu	Pb	Al	Sb	Si	Fe	Cd	Bi	Y	V	Ni	Ti	P	Cr	Te	Zr		
72,6	8	7,4	5,9	3,7	1,5	0,4	0,2	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
Type d'alliage																			
Alliage complexe à base de Zn non-identifié d'après la documentation consultée. Il contient beaucoup d'éléments néfastes aux alliages de zinc. Ressemblance avec la composition de l'objet 16.																			
Diagnostic																			
Contraintes d'utilisation				L'objet a subi des variations de température causées par l'échauffement d'ampoule au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.															
Peste du zinc				Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Les élément Pb et Sn en sont vraisemblablement la cause et les variations de température ont pu jouer un rôle. Le Sn a pu amplifier les déformations.															

Objet N°15 : cadran de commutateur arrêt/marche										Datation : ~1900-1910									
Illustration avec zones d'analyse FRX										Constat d'état visuel des altérations									
										Sur l'angle interne : fissure transversale ; Sur l'ensemble de l'objet : réseau de fissures. Sur les points d'attache : lacunes (○) Au dos : produits de corrosion blancs. (fig. 46, p. 12)									
Détermination de la nature du matériau analysé																			
Composition en %																			
Zn	Si	Al	P	Pb	Fe	Cu	Sn	Cd	V	Cr	Mn	Ti	Ni	Bi	Y	Zr			
72,5	15,3	5,7	1,9	1,8	1,1	0,9	0,5	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1			
Type d'alliage																			
Alliage Zn-Si-Al avec beaucoup d'autres éléments. L'objet est antérieur au brevet du zamak. Il est qualifié d'alliage obsolète.																			
Diagnostic																			
Contraintes d'utilisation				L'objet de l'habitacle du véhicule souvent ouverts a subi des variations de températures naturelles. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.															
Peste du zinc				Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Les éléments Pb et Fe et Sn en sont vraisemblablement la cause. Le rôle de P n'est pas clair.															

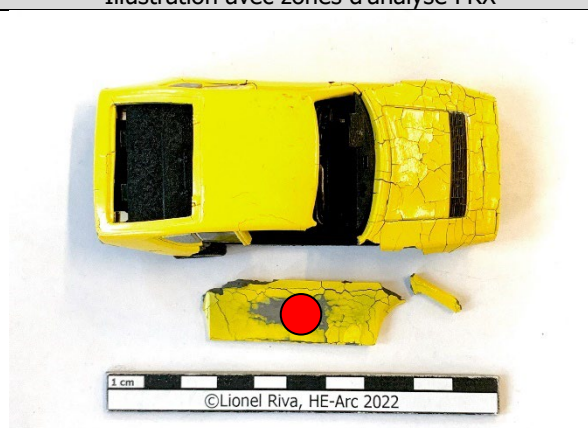
Objet N°16 : commutateur arrêt/marche Delaunay-Belleville											Datation : 1909													
Illustration avec zones d'analyse FRX											Constat d'état visuel des altérations													
											Aucune altération.													
Détermination de la nature du matériau analysé																								
Composition en %																								
Zn	Sn	Cu	Al	Si	Pb	Fe	P	Cd	V	Cr	Ti	Bi	Sb	Ni	Y									
76,8	11,1	6,8	2,3	1,3	1,2	0,3	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1								
Type d'alliage																								
Alliage complexe avec fraction importante d'Sn. L'objet est antérieur au brevet du zamak. Il est qualifié d'alliage obsolète. Ressemblance avec la composition de l'objet 14.																								
Diagnostic																								
Contraintes d'utilisation			L'objet de l'habitacle du véhicule ouvert (<i>annexes : photo X et X, p. XX</i>) a subi des variations de températures naturelles. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.																					
Pas de peste du zinc																								

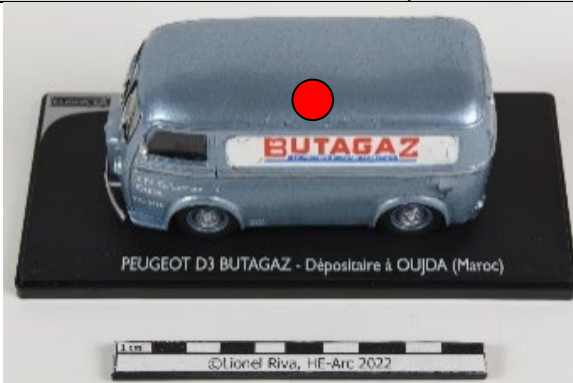
Objet N°17 : contacteur avec clé										Datation : ~1920-1940																			
Illustration avec zones d'analyse FRX										Constat d'état visuel des altérations																			
										Sur l'ensemble de la partie en alliage de zinc de l'objet (○) : réseau de fissures (<i>fig. 83, p. 13</i>).																			
Détermination de la nature du matériau analysé																													
Composition en %																													
Zn	Cu	Pb	Si	Al	Fe	Cd	Sn	W	Cr	P	V	Ti	Mn	Bi	Co	Zr	Y												
69,4	16,6	5,4	3,4	1,6	1,5	0,6	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1												
Type d'alliage																													
Alliage complexe à base de Zn non-identifié d'après la documentation consultée. Il contient beaucoup d'éléments néfastes aux alliages de zinc.																													
Diagnostic																													
Contraintes d'utilisation					L'objet de l'habitacle du véhicule n'a pas subi de fortes variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc ont été soumises à des contraintes mécaniques causées par la rotation de la clé.																								
Peste du zinc					Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Pb, Fe, Cd et Sn en sont certainement responsables. Elles ne semblent pas être influencées par les contraintes mécanique de la clé.																								

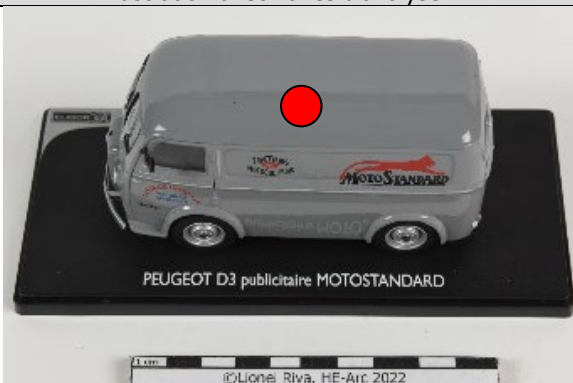
Objet N°18 : pompe à essence « S.E.V. »										Datation : ~1920-1940															
Illustration avec zones d'analyse FRX										Constat d'état visuel des altérations															
										Aucune altération.															
Détermination de la nature du matériau analysé																									
Composition en %																									
N°	Zn	Al	Si	Cu	Fe	Pb	P	V	As	Bi	Cd	Ni	Zr	Cr	W										
1	92,7	4,1	1,6	1	0,3	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	-										
2	96,3	1,8	0,4	1,1	0,1	<0,1	0,1	0,1	-	<0,1	-	-	-	0,2	0,1										
Type d'alliage																									
Alliages Zn-Al-Cu-Si. La partie 1 est proche d'un zamak ZP5 mais contient trop de Si.																									
Diagnostic																									
Contraintes d'utilisation				L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.																					
Pas d'altération assimilable à la peste du zinc																									

Objet N°19 : réservoir d'essence secondaire Panhard Dynamic											Datation : ~1936-1940							
Illustration avec zones d'analyse FRX											Constat d'état visuel des altérations							
											Partie 1 : aucune altération.							
											Partie 2 : sur l'ensemble de l'objet : réseau de fissure impliquant d'importantes déformations (<i>fig. 84, p. 13</i>) ;							
Détermination de la nature du matériau analysé																		
Composition en %																		
N°	Zn	Si	Pb	Cu	Al	Sn	As	Fe	P	Bi	V	Y	Cr	Mn	Cd	Ni	Zr	
1	80,5	7,9	4,6	2,4	2,4	-	0,8	0,8	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
2	82	7,5	3,7	2,8	2,3	<0,1	0,6	0,7	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Type d'alliage																		
Alliage complexe à base de Zn non-identifié d'après la documentation consultée. Il contient beaucoup d'éléments néfastes aux alliages de zinc. La composition des deux objets est similaire mais le couvercle (partie 2) contient des traces de Sn.																		
Diagnostic																		
Contraintes d'utilisation		L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.																
Peste du zinc		Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. D'après la comparaison des deux parties, Sn semble être responsable dans ce cas.																

Objet N°20 : engrenage sans indications										Datation : non-déterminée									
Illustration avec zones d'analyse FRX										Constat d'état visuel des altérations									
										Sur l'extrémité des dents : fissure transversale et lacunes (fig. 85, p. 13) ;									
										Sur l'ensemble de l'objet : réseau de fissures (fig. 86, p. 14).									
										L'objet est cassé un plusieurs pièces.									
Détermination de la nature du matériau analysé																			
Composition en %																			
Zn	Al	Pb	Si	Cu	Fe	Sn	As	P	Cd	Cr	V	Bi	Ni	Ti	Mn	Sb	Y	Zr	
89,6	3,8	2	2	1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Type d'alliage																			
Alliage Zn-Al-Pb-Si-Cu. Les proportions d'Al et Cu sont proches d'un zamak ZP5. Toutefois, les zamaks ne contiennent que des traces de Pb et Si, contrairement à cet objet.																			
Diagnostic																			
Contraintes d'utilisation				L'identification de l'objet étant compliquée, il n'est pas possible de savoir s'il a été soumis à des variations de températures. Les dents ont toutefois été soumis à des contraintes mécaniques.															
Peste du zinc				Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Pb et Sn en sont certainement responsables. Des microfissures sur les dents dues au moulage ou à l'utilisation on du favorise sont développement. en comparaison à la surface du reste de l'objet.															

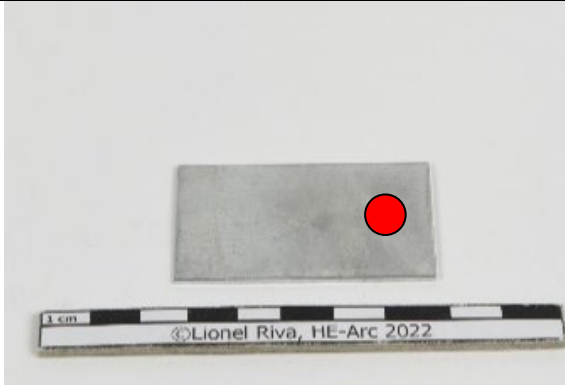
Objet N°21 : modélisme, voiture jaune					Datation : ~1990-2000				
Illustration avec zones d'analyse FRX					Constat d'état visuel des altérations				
					Sur l'ensemble de la surface : réseau de fissures impliquant des légères déformations. L'objet est cassé en plusieurs parties.				
Détermination de la nature du matériau analysé									
Composition en %									
Zn	Al	Ti	Pb	Cr	Si	P	Cu	V	Bi
94,5	5	0,2*	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
*l'analyse fut effectuée à travers des traces de revêtement de surface. Les oxydes de titane sont souvent employés dans les peintures comme opacifiant.									
Type d'alliage									
Alliage Zn-Al légèrement au-delà de l'hypoeutectique avec des traces de Pb.									
Diagnostic									
Contraintes d'utilisation		L'objet ayant conservé dans des conditions d'habitation n'a pas été soumis à de fortes variation de température. N'ayant pas de pièces mobiles, l'objet n'a pas subi de contraintes mécaniques particulières.							
Peste du zinc		Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Pb semble être responsable.							

Objet N°22 : modélisme, fourgon bleu										Datation : ~2000-2020						
Illustration avec zones d'analyse FRX										Constat d'état visuel des altérations						
										Sur l'ensemble de l'objet : réseau de microfissures supposé en raison des légères déformations sur toit et décollement du revêtement de surface sur le toit, le coffre et le côté gauche (<i>fig. 87, p. 14</i>).						
Détermination de la nature du matériau analysé																
Composition en %																
Zn	Al	Ti	Cu	V	Si	Bi	P	Fe	Cr	Sn	Pb	Mn	As	Zr	Ni	
66,8	22,1	8,4*	0,8	0,6	0,5	0,4	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
*l'analyse fut effectuée à travers le revêtement de surface.																
Type d'alliage																
Alliage Zn-Al-Cu à forte teneur en Al et contenant d'autres éléments																
Diagnostic																
Contraintes d'utilisation			L'objet ayant conservé dans des conditions d'habitation et dans sa boîte d'origine n'a pas été soumis à de fortes variation de température. N'ayant pas de pièces mobiles, l'objet n'a pas subi de contraintes mécaniques particulières.													
Peste du zinc			Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. La présence des autres éléments que Zn, Al et Si sont susceptibles d'en être responsables.													

Objet N°23 : modélisme, fourgon gris							Datation : ~2000-2020						
Illustration avec zones d'analyse FRX							Constat d'état visuel des altérations						
							Aucune altération.						
Détermination de la nature du matériau analysé													
Composition en %													
Zn	Ti	Si	Al	P	Pb	V	Zr	As	Cu	Cr	Bi	Nb	Y
72,9	24,4*	1,2	1	0,2	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
*l'analyse fut effectuée à travers le revêtement de surface.													
Type d'alliage													
Alliage Zn-Si-Al. Ce type de composition n'est pas connu dans la documentation.													
Diagnostic													
Contraintes d'utilisation		L'objet ayant conservé dans des conditions d'habitation et dans sa boîte d'origine n'a pas été soumis à de fortes variation de température. N'ayant pas de pièces mobiles, l'objet n'a pas subi de contraintes mécaniques particulières.											
Pas d'altération assimilable à la peste du zinc													

Objet N°24 : modélisme, voiture bleue		Datation : ~2000-2020					
Illustration avec zones d'analyse FRX		Constat d'état visuel des altérations					
		Sur toute la surface : réseau de microfissures suspecté en raison du gonflement de revêtement de surface (<i>fig. 85, p. 14</i>) ; Sur les charnières des portes, du capot et du coffre : important réseau de fissures, pièces cassées (<i>fig. 89, p. 14</i>).					
Détermination de la nature du matériau analysé							
Composition en %							
Zn	Al	V	Ti	Pb	P	Cr	Ni
95,7	4	0,1	0,1*	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
*l'analyse fut effectuée à travers des traces de revêtement de surface.							
Type d'alliage							
Alliage Zn-Al proche de l'hypoeutectique contenant des traces de Pb.							
Diagnostic							
Contraintes d'utilisation	L'objet ayant conservé dans des conditions d'habitation n'a pas été soumis à de fortes variation de température. Ayant pas de pièces mobiles au niveau du capot, du coffre et des portes, l'objet n'a pas subi de légères contraintes mécaniques sur les des sections fines.						
Peste du zinc	Les altérations sont assimilables à la peste du zinc. Pb semble être responsable. Les charnières particulièrement touchées le sont certainement du fait de leur faible épaisseur plus qu'en raison des contraintes mécaniques.						

Objet N°25 : modélisme, voiture jaune 2						Datation : ~1995-2005					
Illustration avec zones d'analyse FRX						Constat d'état visuel des altérations					
						Aucune altération de la carcasse métallique.					
Détermination de la nature du matériau analysé											
Composition en %											
Zn	Ti	Si	Al	Fe	V	P	Cr	Bi	As	Zr	
79,1	9,4*	6,4	4,6	0,2	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
*l'analyse fut effectuée à travers le revêtement de surface. Les oxydes de titane sont souvent employés dans les peintures comme opacifiant.											
Type d'alliage											
Alliage Zn-Si-Al contenant un peu de fer.											
Diagnostic											
Contraintes d'utilisation		L'objet ayant conservé pendant plus de dix en ans en extérieur, il a subi des variations de température naturelles. Il présente des fortes traces d'usures dues au jeu comme en témoigne l'état du revêtement de surface et des matériaux en polymères de synthèse cassés.									
Pas d'altération assimilable à la peste du zinc											

Objet N°26 : plaque de zinc		Datation : non-déterminée					
Illustration avec zones d'analyse FRX		Constat d'état visuel des altérations					
		Aucune altération.					
Détermination de la nature du matériau analysé							
Composition en %							
Zn	Al	Si	Cu	Ti			
98,7	0,8	0,2	0,1	0,1			
Type d'alliage							
Zn pur à 98,7 %							
Diagnostic							
Contraintes d'utilisation	L'historique de cet échantillon est inconnu.						
Pas d'altération assimilable à la peste du zinc							

Objet N°27 : lingot de zamak					Datation : 2022				
Illustration avec zones d'analyse FRX					Constat d'état visuel des altérations				
					Aucune altération.				
Détermination de la nature du matériau analysé									
Composition en %									
Zn	Al	Cu	W	Si	Cr	P	V	Pb	Ti
89,8	7	2,8	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Type d'alliage									
Alliage Zn-Al-Cu avec de proportions d'Al entre un zamak ZP6 et ZP7. Il est un peu trop riche en cuivre.									
Diagnostic									
Contraintes d'utilisation		Depuis son achat, l'objet a été conserve dans des conditions d'habitation et n'a pas été soumis à des contraintes mécaniques.							
Pas d'altération assimilable à la peste du zinc									

Objet N°28 : cuve de carburateur « Dell'Orto » de Piaggio Ciao				Datation : 1972	
Illustration avec zones d'analyse FRX			Constat d'état visuel des altérations		
			Aucune altération.		
Détermination de la nature du matériau analysé					
Composition en %					
Zn	Al	Cr	P	V	Ni
94	5,9	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Type d'alliage					
Alliage Zn-Al. Sa concentration en Al est proche d'un zamak ZP6 mais il devrait contenir du Cu.					
Diagnostic					
Contraintes d'utilisation		L'objet du compartiment moteur a subi des variations de température au cours de sa période d'utilisation. Les pièces de l'objet en alliage de zinc n'ont pas été soumises à des contraintes mécaniques.			
Pas de la peste du zinc					

Objet N°29 : frein pour porte de maison					Datation : 2022				
Illustration avec zones d'analyse FRX					Constat d'état visuel des altérations				
					Aucune altération.				
Détermination de la nature du matériau analysé									
Composition en %									
Zn	Al	Cu	Cr	Si	P	Ni	Ti	Zr	
93	5,5	1,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Type d'alliage									
Alliage Zn-Al-Cu proche d'un zamak 5.									
Diagnostic									
Contraintes d'utilisation		Des parties internes sont sollicitées par des ressorts.							
Pas d'altération assimilable à la peste du zinc									

Objet N°30 : collier		Datation : ~2000-2020			
Illustration avec zones d'analyse FRX		Constat d'état visuel des altérations			
		Aucune altération.			
Détermination de la nature du matériau analysé					
Analyse FRX non terminée					
Type d'alliage					
Alliage Pb-Cu → non retenu pour l'étude					

3. Mesures DiscoveryMat

