

OPTIMISATION DE LA BASE DE DONNÉES DISCOVERYMAT POUR L'ANALYSE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM DES CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT D'AUTOMOBILES ANCIENNES

ELODIE GRANGET¹, BRICE CHALANÇON² ET CHRISTIAN DEGRIGNY³

1 - Unité de recherche de la Haute-école arc Conservation-Restauration (UR-Arc CR), University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland, Neuchâtel, Suisse

elodie.granget@gmail.com

2 - Musée National de l'Automobile de Mulhouse – collection Schlumpf (MNAM), Mulhouse, France

INTRODUCTION

Les partenariats entre écoles, laboratoires de recherche et institutions sont souvent de grands moteurs d'innovation. Le milieu de la conservation du patrimoine n'y fait pas exception. Conscients des avantages d'une telle dynamique de travail, la Haute-école Arc conservation-restauration (HE-Arc CR) et son unité de recherche (UR-Arc CR), basées à Neuchâtel, Suisse, et l'atelier de restauration du Musée National de l'Automobile de Mulhouse (MNAM), France, collaborent depuis plusieurs années sur des projets aux objectifs divers : formation et recherche appliquée sur des problématiques propres à la conservation-restauration du patrimoine automobile. Le présent projet englobe ces points. En effet, l'atelier du MNAM avait depuis longtemps identifié des problèmes récurrents de corrosion de pièces en alliages d'aluminium dans les circuits de refroidissement de ses véhicules fonctionnels. Il a donc approché la HE-Arc CR afin d'étudier un corpus de pièces de véhicules représentatifs des problèmes identifiés. Le but était de mieux comprendre ces altérations et à terme de pouvoir proposer des pistes quant à leur maîtrise. Un projet de Master s'est donc mis en place sous la supervision de l'UR-Arc CR. Il avait pour objectifs non seulement de réaliser l'étude demandée par l'atelier de restauration du MNAM, mais également d'évaluer les performances de nouveaux outils d'analyse portables, peu coûteux, d'utilisation facile et libre d'accès sur des objets du patrimoine technique automobile en aluminium. Cet article aborde en particulier la manière dont l'un de ces outils, DiscoveryMat, a été optimisé pour identifier les alliages du corpus d'étude.

PROBLÉMATIQUE

LE MUSÉE ET SA COLLECTION DE VÉHICULES DYNAMIQUES

La collection du MNAM a été principalement constituée dans le courant des années 1960 par les frères Schlumpf, deux industriels. La collection est découverte lors des contestations ouvrières de la fameuse « affaire Schlumpf ». L'usine est à ce moment-là occupée et la collection exploitée par le Musée des ouvriers, jusqu'à la mise en faillite de leur entreprise au tournant des années 1980 (Culturespaces, 2021). Les biens des deux frères sont liquidés sur décision judiciaire. La collection automobile devient alors propriété de l'Association du Musée National de l'Automobile. En 2000, l'exploitation du musée est confiée à la société privée Culturespaces. Cette collection est toujours conservée et exposée sur les 25 000 m² de l'ancienne filature de laine des deux frères, à Mulhouse (Keller et Garnier, 2012). Elle compte plus de 600 véhicules dont 80 véhicules dynamiques, c'est-à-dire qui sont en état de fonctionnement et qui sont mis en service annuellement. De par leur statut particulier, ils sont accompagnés d'un

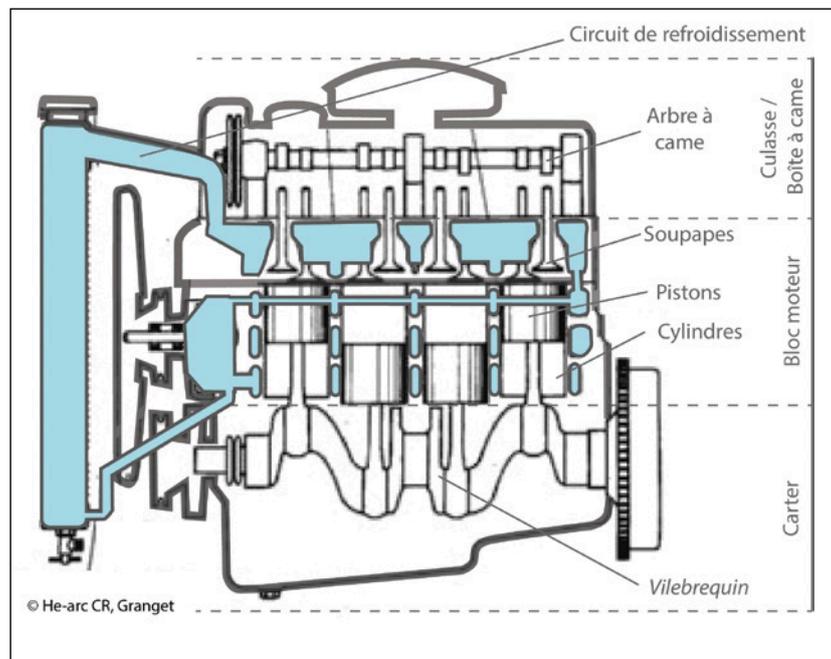
« carnet de suivi » qui documente les traitements appliqués lors du service annuel, les conditions de chaque mise en fonctionnement et les remarques importantes quant à l'évolution de l'état de conservation. Cette documentation permet de discuter au cas par cas le maintien en fonctionnement d'une automobile. Au fil des années, l'atelier de restauration du musée, responsable du suivi et de l'entretien des collections, a identifié plusieurs véhicules dynamiques montrant des problèmes de corrosion sur les pièces en alliage d'aluminium des circuits de refroidissement. C'est notamment le cas pour les véhicules produits entre 1920 et 1940, en particulier les modèles de Bugatti. Il a alors effectué une sélection de véhicules et de pièces déposées représentatifs des problèmes qu'il a identifiés. Cette sélection a servi de corpus d'étude pour ce travail.

LE CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT

Un moteur à explosion a pour fonction de transformer l'énergie thermique de la combustion d'un carburant en énergie cinétique. Les processus de transformation et de transmission de cette énergie sont imparfaits. En tout, près de 2/3 de l'énergie de combustion est perdue sous forme de chaleur au cours du processus (Poulain, 1995). Ceci génère d'énormes contraintes thermiques pour le moteur, en particulier le bloc contenant les cylindres, où glissent les pistons, et le bloc supérieur où se trouve la chambre à combustion.

Le circuit de refroidissement (en bleu sur la figure 1) permet de réguler la température en la capturant au sein du moteur à l'aide d'un liquide caloporteur. On remplissait à l'origine ces circuits avec de l'eau de ville, aujourd'hui, il s'agit généralement d'un mélange aqueux commercial (eau et antigels). Ce liquide circule autour des zones d'échauffement dans les parois chemisées du bloc moteur et est ensuite acheminé au travers d'un réseau de pipes vers un radiateur, où il est refroidi avant de retourner dans le moteur. La circulation de ce liquide de refroidissement est parfois également assistée par une pompe à eau.

Fig. 1: Représentation en coupe latérale d'un moteur et de son circuit de refroidissement en bleu.
©HE-Arc CR, Granget. basé sur image de wikip.fr



Dans le cas des véhicules du corpus d'étude, le bloc moteur est généralement en acier de fonderie, la boîte couvrant l'arbre à came ou la culasse (en fonction des modèles) sont en alliages d'aluminium de fonderie. C'est également le cas du corps de la pompe à eau et de la plupart des pipes reliant le moteur au radiateur. Ces pipes sont reliées avec les autres parties du circuit de refroidissement à l'aide de durites

en caoutchouc. Les radiateurs du corpus ont soit une structure en nid d'abeille ou à rayons et sont tous en alliages cuivreux (Granget, 2020).

Les pièces d'intérêt sont donc à priori réalisées en alliages d'aluminium de fonderie, probablement coulées dans des moules en sable pour les petites productions, ou dans des coquilles pour les plus grandes séries. Au début du 20^e siècle, des alliages riches en cuivre (Cu) ou en silicium (Si) étaient utilisés pour la réalisation de telles pièces (Fig. 2).

	COMPOSITION P. 100						ÉTAT
	Cu	Si	Mg	Mn	Ti	Ni	
Cu	8						Coulé en sable. Coulé en coquille.
	12						— — , traité.
Cu-Ti (AP 33)	4,5				0,4		Coulé en coquille. — — , traité.
Alpax		12 à 13					Coulé.
Alpax spéciaux		12,5	0,3	0,5			— , traité (suivant durée de chauffage). Coulé en sable. — en coquille.
Si-Mg-Mo	1	14 4	1 1	1		2	Coulé en sable. — en sable, traité.
Alliage Y	4		1,5			2	Coulé en coquille, traité. Coulé en sable.
Alliage RR 53.	2,25	1,25	1,6		0,1	1,3	— — , traité.
Hypersiliciés.		18 à 25					Coulé en sable, traité. Coulé en coquille, traité. Coulé en coquille, traité.

Fig. 2: Alliages d'aluminium pour moulages. Extrait tableau ©BSPI 150, 1936

LES ALTÉRATIONS DES PIÈCES EN ALLIAGES D'ALUMINIUM

Un constat d'état a été réalisé sur les pièces en alliages d'aluminium du corpus de véhicules dynamiques sélectionnés par le MNAM (Granget, 2020). Les altérations identifiées peuvent être classées en deux groupes: des problèmes de corrosion et des altérations mécaniques sur les surfaces internes.

Les problèmes de corrosion se développent en particulier aux points de jonction de deux pièces. Le cas le plus représentatif est celui des assemblages entre les pipes en alliage d'aluminium et les durites en caoutchouc. Des produits blancs, gélatineux et volumineux se développent et compromettent l'étanchéité du circuit (Figure 3). Ces produits ont parfois une teinte bleue ou verte, typique des produits cuivreux. Les durites finissent par se fissurer et doivent être remplacées. Une fois les durites retirées, il est possible de constater que les mêmes produits se sont développés sur les surfaces intérieures de la pipe et ont parfois consommé le métal dans sa totalité. Les produits internes sont pollués par d'autres éléments transportés par le liquide de refroidissement, donnant des colorations diverses allant du vert à l'orange (Figure 4).



Fig. 3: Corrosion sous la durite à l'entrée d'une pompe à eau de Bugatti. ©MNAM



Fig. 4: Corrosion sous la durite d'une pipe de Bugatti. Démontage pour restauration. ©MNAM

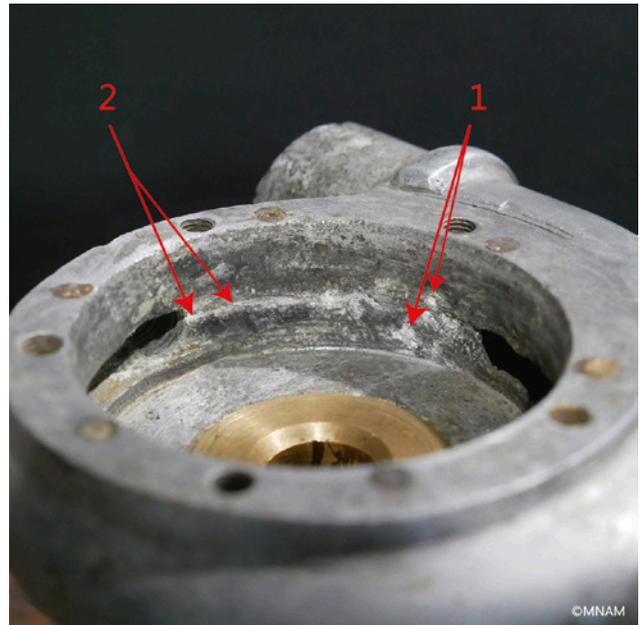


Fig. 5: Cratères (1) et érosion (2) des ouvertures internes d'une pompe à eau déposée de Bugatti. ©MNAM

Le deuxième type d'altération survient à l'intérieur des circuits, où l'on a relevé des traces d'érosion ainsi que la formation de cratères sur les surfaces internes, en particulier dans les zones d'étranglement à l'entrée des pompes à eau et dans les pièces soudées du circuit (Figure 5). Ces cratères sont parfois remplis de dépôts orange-bruns, provenant probablement de substances transportées depuis d'autres parties du circuit, généralement en alliage cuivreux ou en acier.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les deux questions qui se posent sont : pourquoi certaines pièces et zones du circuit sont de toute évidence plus touchées que d'autres ? Quels sont ces alliages visiblement très sensibles à la corrosion ?

Afin de répondre à ces questions, il était nécessaire de caractériser les alliages d'aluminium du corpus. Un des objectifs fixés était de réaliser des analyses avec des moyens transportables sur site et que l'institution pourrait à terme continuer à utiliser. L'outil DiscoveryMat développé par l'UR-Arc CR a été sélectionné car bien que donnant des résultats qualitatifs, il est libre d'accès et bien moins coûteux que d'autres méthodes d'investigation telle que la spectroscopie par fluorescence des rayons X (FRX) (Degrigny, 2011).

L'analyse est basée sur le suivi de l'évolution du potentiel d'abandon (E_{corr}) du métal étudié en fonction du temps, réalisé dans trois solutions différentes : eau minérale Evian (pH=7.2), nitrate de potassium 1% mass. (pH=5.9), sesquicarbonate de sodium 1% mass. (pH=9.5). Les alliages d'aluminium se passivent normalement dans ces solutions (Pourbaix, 1963). Le potentiel d'abandon E_{corr} est le potentiel pris par un métal au contact d'une solution, sans apport de courant extérieur. Si sa valeur augmente au cours du temps, le métal se passivé, si au contraire elle diminue le métal se corrode (Degrigny *et al.* 2018). De précédents travaux ont permis d'affiner le protocole de mesure de DiscoveryMat (Degrigny, 2011) de manière à obtenir des tracés stables, reproductibles et interprétables sur les objets patrimoniaux de divers alliages de cuivre (Degrigny, 2012), d'argent (Fontaine, 2012) ou encore d'aluminium (Despland, 2018).

Le matériel requis est représenté sur la Figure 6. L'électrode de référence Ag-Cl [1] est prolongée d'un pont fritté [2] contenant une des solutions-tests. Il est nécessaire de laisser l'électrode se stabiliser pendant au moins 20 min après mise en place du pont. Il est possible de réaliser des mesures stables pendant 2h avant de devoir changer à nouveau la solution dans le pont de l'électrode. Le contact électrique entre l'objet [3] et le voltmètre [4] est assuré par une pince crocodile [5].

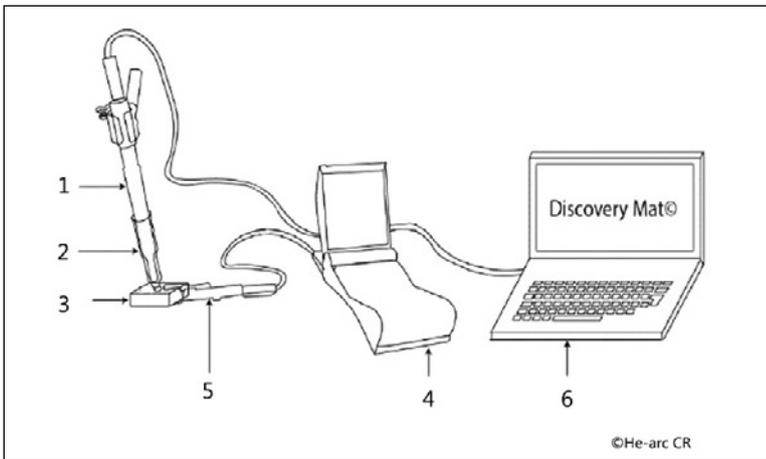


Fig. 6: Montage du matériel DiscoveryMat. ©HE-Arc CR, Granget, basé sur Despland 2018

Enfin, la surface de l'objet est localement polie au grain 4000, rincée à l'eau déminéralisée et l'électrode de référence et son pont sont positionnés à quelques mm de la surface du métal (Figure 7 A). La mesure est réalisée par insertion d'une goutte de solution-test entre la surface de l'objet et le fritté de l'électrode. Pour chacune des solutions-tests, l'évolution du comportement du métal au contact avec la solution est enregistrée pendant 15 minutes avec DiscoveryMat [6] par le biais du voltmètre, après s'être assuré de la reproductibilité des mesures par l'acquisition de quelques tracés de 5 minutes. Une fois la mesure effectuée avec toutes les solutions, les 3 tracés sont associés et comparés à ceux des entrées de la base de données, constituée d'alliages de composition déterminée par FRX. Un algorithme calcule la « distance de similarité (d) » entre les tracés du matériau étudié et ceux de toutes les entrées de la base de données, à partir de la pente et de la courbure des tracés et des valeurs en fin de mesure. Plus cette distance d est petite, plus la correspondance est proche, un d de zéro correspondant à une superposition parfaite des tracés. Il n'y a pas de valeur maximale de d, mais dans le cadre de ce projet la limite a été placée à $d < 2000$ pour une correspondance satisfaisante (Granget, 2020). Les résultats de ces calculs sont visualisables sous la forme d'un tableau classé par d croissant (Figure 7 b), et de graphes comparant les tracés (Figure 7 c).

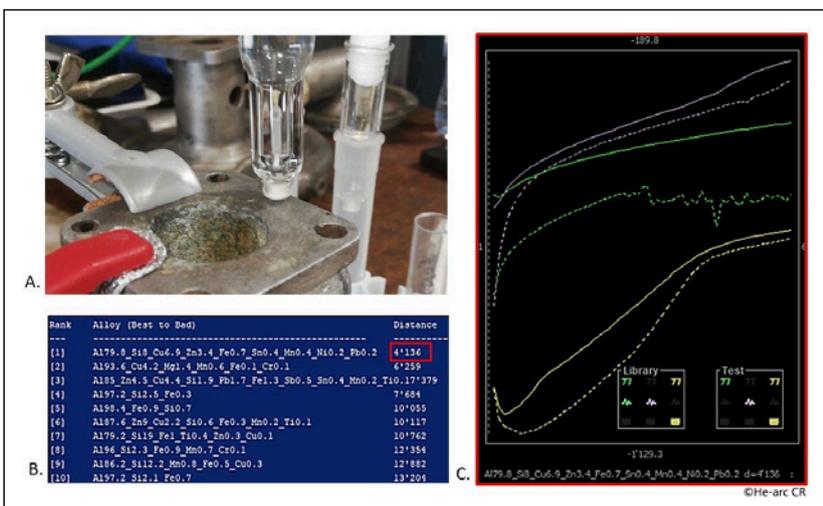


Fig. 7: Exemple de mesure sur une pipe de Bugatti. A: Localisation de la mesure. B: Meilleure correspondance présentée sous forme de tableau. C: Comparaison graphique du fichier-test avec la meilleure correspondance. Les cartels Library et Test renseignent sur les observations faites lors de la prise de mesure comme (de haut en bas) d'éventuels décalages de la courbe au cours des essais de reproductibilité, des fluctuations du tracé ou encore l'apparition d'une marque en surface après la mesure. © HE-Arc CR, Granget

RÉSULTATS ET DISCUSSION

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

Une partie du corpus étudié comportait des pièces déposées de leur véhicule. Elles ont servi à une première mise en application de l'outil DiscoveryMat, dans le but d'évaluer les performances de sa base de données, comportant encore peu de références pour les alliages d'aluminium (Al). Les mesures ont été réalisées tant que possible sur des zones discrètes (bords, surfaces cachées). Cette première campagne d'analyse DiscoveryMat s'est montrée informative à plusieurs niveaux. D'abord, les tracés dans les trois solutions présentent le comportement attendu pour des alliages d'aluminium et montrent une bonne reproductibilité. Ensuite, l'impact du polissage de la surface à analyser a été jugé acceptable par les responsables des collections et les éventuelles marques pouvant survenir au contact des solutions (sesquicarbonate de sodium notamment) sont facilement retirées (Granget, 2019).

Il a été possible de se faire une première idée des éléments principaux présents dans ces alliages (Tableau 1, 3^{ème} colonne). Quelques pièces ont montré un comportement semblable aux alliages aluminium-silicium (Al-Si) de concentration ~10-13% dans la base de données. Cependant, la majorité des pièces analysées semblent être constituées d'aluminium contenant du cuivre (Cu), du silicium (Si) et du zinc (Zn) en proportions difficilement définissables. Sur la base des altérations relevées lors du constat d'état, on s'attendait en effet à trouver des alliages contenant beaucoup de cuivre. Par ailleurs, les références avec les plus hautes teneurs en cuivre ont obtenu les plus bas, comme sur la Figure 7 B où les 3 premières références sont les alliages les plus riches en cuivre de la base de données, 4.2% - 4.4% - 6.9%.

Tableau 1: Résultats préliminaires des analyses DiscoveryMat. Evaluation de la pertinence (bonne: vert - acceptable: jaune - mauvaise: orange) en comparaison avec les résultats par FRX

	DISCOVERYMAT			
PIÈCE	D	ÉLÉMENTS PRÉSENTS	SPECTROSCOPIE PAR FLUORESCENCE X	
HISPANO SUIZA A	1319	Al, Si, Cu, Zn	Al90.6_Cu6.5_Sn1.7_Fe0.7_Si0.5	Orange
HISPANO SUIZA B	2008	Al, Si	Al88.3_Si10.1_Cu0.8_Fe0.6_Zn0.1_Pb0.1	Vert
PANHARD A	7178	???	Al86.9_Cu8.9_Ni2_Fe1.4_Si0.5_Pb0.3	Orange
PANHARD B	5579	???	Al89.2_Cu7.6_Ni1.8_Si0.7_Fe0.7	Orange
PANHARD C	6851	???	Al76.9_Si12.6_Cu10_Fe0.5	Orange
PEGASO	3350	???	Al82.7_Cu12.2_Si2.8_Fe0.9_Ni0.5_Zn0.3_Pb0.3_Mn0.3	Orange
BUGATTI T37 A	4136	Al, Si, Cu, Zn	Al85.3_Cu11_Si1.3_Zn1.1_Fe1.1_Pb0.2	Jaune
BUGATTI T37 B	2085	Al, Si, Cu, Zn	Al90_Cu7.4_Fe1_Zn0.8_Si0.7_Pb0.1	Jaune
BUGATTI T37 D	3897	Al, Si, Cu, Zn	Al89.6_Cu6.7_Si1.8_Fe1_Zn0.8_Pb0.1	Jaune
BUGATTI T37 E	2504	Al, Si	Al82.7_Si13.4_Cu2_Ni0.8_Fe0.8_Mn0.2_Zn0.1	Vert
BUGATTI TX	1146	Al, Si, Cu, Zn	Al83.2_Cu9.9_Zn3.2_Si2.1_Fe1.3_Pb0.3	Jaune

Les résultats médiocres de ces premières mesures indiquent la nécessité d'augmenter le nombre d'alliages d'aluminium dans la base de données DiscoveryMat pour une meilleure caractérisation des alliages d'aluminium du patrimoine automobile. Pour ce faire, une campagne d'analyses FRX (ThermoFisher scientific, Niton™ XL3t XRF Analyser – 60sec General Metals) a été menée pour chaque pièce ayant fait l'objet

de tracés DiscoveryMat. Il a été possible d'évaluer la pertinence des hypothèses de composition émises lors de l'analyse DiscoveryMat en les comparant avec les valeurs quantitatives FRX. Elles ont été jugées bonnes si les éléments principaux (>1%) étaient présents dans le bon ordre, acceptables si les éléments principaux ont été identifiés mais pas dans les bonnes proportions, et mauvaise si la proposition divergeait complètement de la composition réelle (Tableau 1, 5ème colonne).

Cette campagne a en outre confirmé que la plupart des pièces avaient du cuivre comme élément principal d'alliage. En fait, le corpus s'est révélé contenir 3 groupes d'alliages distinctes : des alliages eutectiques Al-Si (~12-13%) contenant parfois du cuivre, des alliages hypersiliciés (>13% Si) et des alliages Al-Cu (4-14%) et contenant également du Si mais aussi du Zn, du nickel (Ni) ou de l'étain (Sn). A noter que la présence de fer (Fe) et de plomb (Pb) est attendue et résulte du processus d'extraction de l'aluminium (Degryny, 2018). La catégorie des Al-Cu comprend toutes les pièces problématiques du corpus (Figure 8).

Le comportement électrochimique et la composition chimique des pièces du corpus étant désormais connus, ils ont pu être incorporés à la base de données afin de l'enrichir. Il est important de relever que la majorité de ces nouvelles entrées sont des alliages Al-Cu.

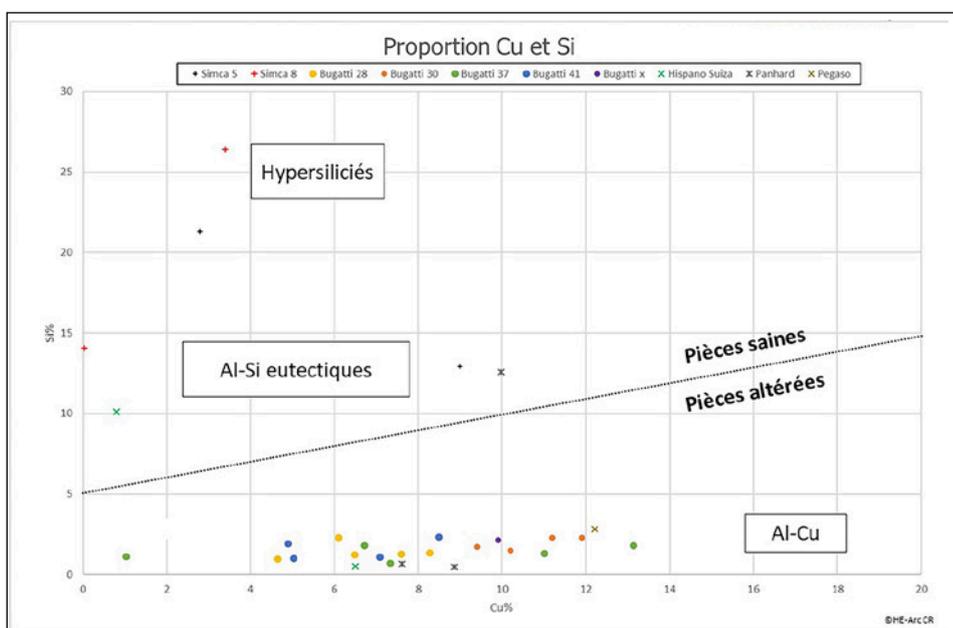


Fig. 8 : Présentation des alliages du corpus étudié, en fonction de leur concentration en Cu et Si. Trois familles d'alliages se distinguent. © HE-Arc CR, Granget

RÉSULTATS APRÈS OPTIMISATION DE LA BASE DE DONNÉES

Une nouvelle série de mesures DiscoveryMat a été réalisée sur d'autres pièces en alliage d'aluminium du corpus mais cette fois toujours assemblées sur leur véhicule, de manière à confirmer la mise en œuvre de l'outil in situ sur des objets patrimoniaux, déjà démontrée sur d'autres types de collections. Au terme de cette deuxième campagne de mesure, les tracés obtenus ont servi à interroger la 1ère version de la base de données et celle optimisée suite à l'enrichissement des données de la section 4.1. Ceci a permis de comparer la pertinence et la précision des résultats obtenus et ainsi valider l'amélioration des performances de l'outil après optimisation de la base de données.

Les analyses quantitatives FRX ayant montré que les familles d'alliages d'aluminium du corpus contenaient majoritairement du cuivre ou du silicium, l'amélioration des performances de l'outil a été évaluée séparément pour ces deux éléments. Une nette diminution proportionnelle de d est observée pour les alliages Al-Cu (Figure 9). Ceci peut être directement attribué à l'augmentation d'entrées de ce type d'alliages dans la base de données. Les quelques pièces qui ont montré une amélioration moindre sont des pièces ayant des compositions très différentes de celles ajoutées à la base de données,

notamment au niveau des éléments d'alliages à plus faible concentration (Ni, Sn). Il en va de même pour les pièces riches en silicium (Figure 10). Les alliages eutectiques Al-Si à forte concentration de cuivre (Pan c, T5b) étant représentés dans la nouvelle base de données, ils ont vu leur d significativement réduite. Les autres alliages n'ayant pas de semblables parmi les nouvelles références, aucune amélioration n'a été observée.

En plus d'une diminution de d , la pertinence des hypothèses de composition a également été améliorée. S'il était parfois possible de se faire une idée des éléments principaux présents dans l'alliage avec la 1^{ère} version de la base de données, il est à présent presque certain d'identifier le type d'alliage. Dans le cas des Al-Si eutectique et Al-Cu, on a à peu près une idée de la proportion de chacun des éléments principaux, ainsi que des éventuels éléments en plus faible concentration.

Fig. 9 : Evolution de la distance de similarité (d) entre les résultats obtenus pour les pièces riche en cuivre du corpus. Comparaison entre la 1^{ère} version de la base de données de DiscoveryMat et celle optimisée (proportions de Cu et Si selon analyses FRX affichées en étiquette de données.)

© HE-Arc CR, Granget

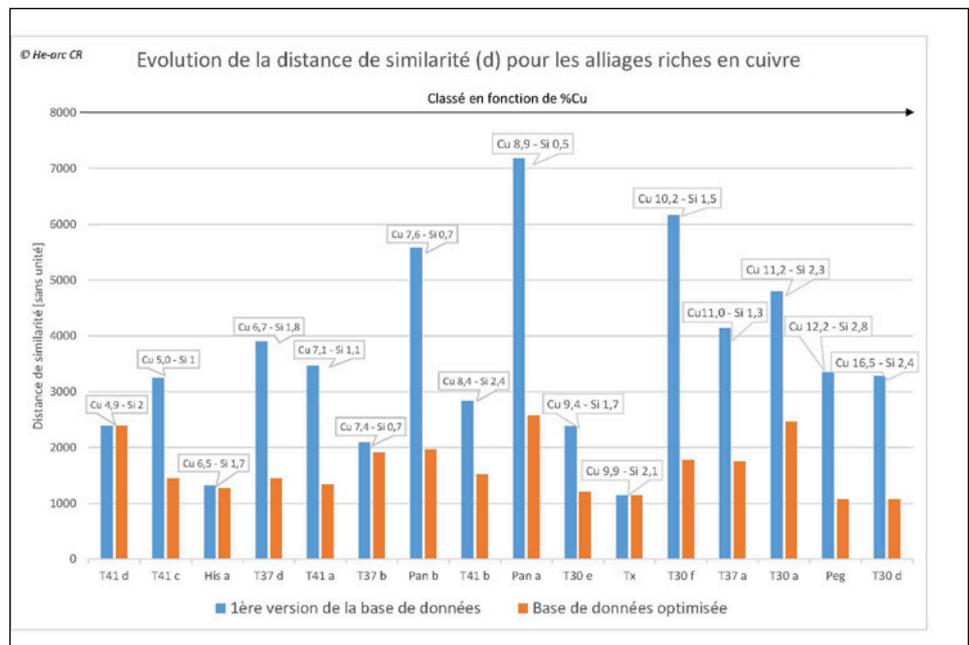
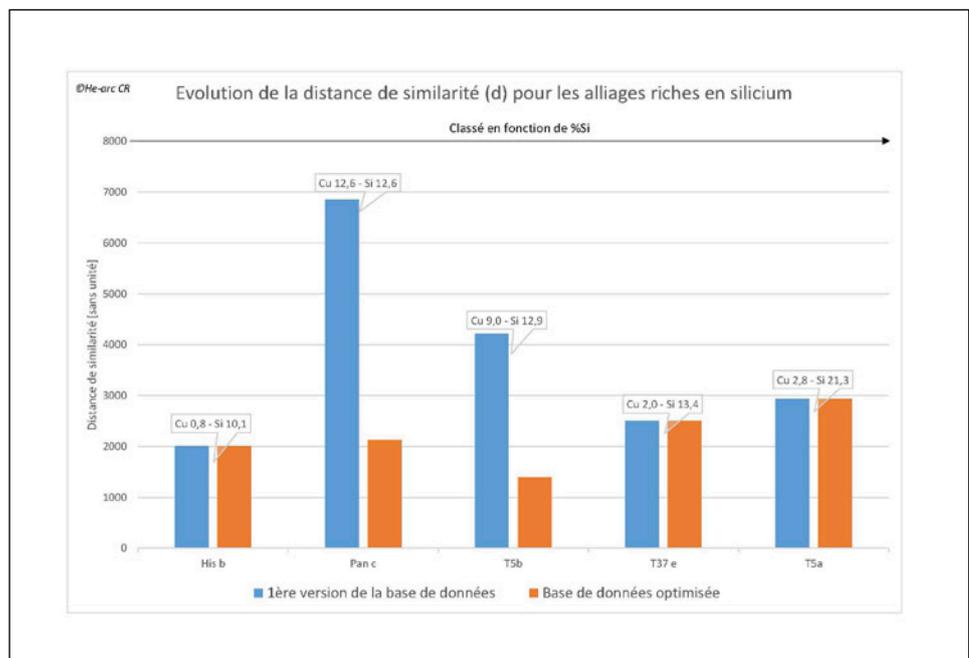


Fig. 10 : Evolution de la distance de similarité (d) entre les résultats obtenus pour les pièces riche en silicium du corpus. Comparaison entre la 1^{ère} version de la base de données de DiscoveryMat et celle optimisée (proportions de Cu et Si selon analyses FRX affichées en étiquette de données.)

© HE-Arc CR, Granget



CONCLUSION

Au terme de cette étude, 21 nouvelles entrées ont été ajoutées à la base de données de DiscoveryMat. Cette optimisation a permis d'obtenir des informations cruciales sur la composition des pièces du corpus étudié. En effet, en croisant les résultats DiscoveryMat avec les observations faites lors du constat d'état, il est possible d'affirmer que toutes les pièces très corrodées sont des alliages Al-Cu avec souvent une forte concentration de Si et pouvant aussi contenir d'autres éléments tels que du Zn, du Ni ou du Sn. Ce type d'alliage, dont différentes recettes ont existé au début du XX^e siècle, étaient en effet appréciés pour leur facilité de moulage et leur bonne conductivité thermique (Vargel, 1999 ; BSPI, 1936). Ils sont maintenant connus pour leur faible résistance à la corrosion, puisqu'ils contiennent non seulement du Cu, mais également d'autres éléments tels que le Zn et le Sn (Degrigny, 2019). Dans le cas des véhicules dynamiques du MNAM, le choix de matériaux à faible résistance à la corrosion combiné à la présence de zones confinées et un débit probablement inadapté du liquide de refroidissement permet d'expliquer les altérations prononcées présentées en début d'article.

De manière plus générale, ce travail démontre qu'il est possible de caractériser des alliages d'aluminium à l'aide de l'outil DiscoveryMat avec une bonne précision si la base de données contient des entrées similaires. Il met de ce fait en avant l'intérêt d'investir du temps en amont de manière à adapter l'outil au type de patrimoine fréquemment analysé par l'institution ou l'atelier qui souhaite l'utiliser. L'UR-Arc CR peut par ailleurs être contactée dans le cas où une institution souhaiterait mettre à disposition un corpus d'objets en alliages encore non-référencés dans l'outil et ainsi contribuer à son développement. En effet, les performances des outils libres d'accès sont à la mesure de l'investissement de la communauté qui les utilisent et bénéficient toujours grandement de l'implication de ses membres actifs et contributeurs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article tiennent à remercier :

L'Association pour la Gestion du Musée National de l'Automobile (Collection Schlumpf) pour avoir accepté d'accueillir et encadrer Mme Granget dans le cadre de son stage de Master. Ce stage a par ailleurs bénéficié de la bourse du Swiss-European Mobility Programme (SEMP).

La Haute-Ecole arc de Neuchâtel (CH) et Microcity à la Chaux-de-Fonds (CH) pour avoir fourni l'équipement, accès aux analyses et le suivi nécessaire à la réalisation de cette étude.

Messieurs Christian Vargel, ingénieur expert de la corrosion de l'aluminium, et Claude Riss, de l'Institut pour l'Histoire de l'Aluminium, pour leur expertise lors du constat d'état.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BSPI. « Bulletin de la société d'encouragement pour l'industrie nationale », Paris: Société d'encouragement pour le développement de l'industrie nationale, Vol. BSPI 150, 1^{er} et 2^{ème} semestre 1936.
- Culturespaces. « Un peu d'histoire – L'affaire Schlumpf », Cité de l'automobile [En ligne], www.citedelautomobile.com/un-peu-dhistoire#11 accès en août 2021.
- Degrigny, C, E Menart, et G Erny. « Easy-to-use, low-cost electrochemical open-source hardware to analyse heritage metals: possibilities and limits », *Current Topics in Electrochemistry*, vol. 20, 2018: 15-23. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/122092/2/349246.pdf>
- Degrigny, C. « CLAMTEC Project », Internal report. Neuchâtel: Haute Ecole arc Conservation Restauration, 2012. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.1844.0569>.
- Degrigny, C. « SPAMT-Test Project », Internal report. Neuchâtel: Haute Ecole arc Conservation Restauration, 2011. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.4465.4969>.
- Degrigny, C. « The conservation of Historical Marine, Terrestrial and Industrial Aluminium Objects: A Review », *Aluminium: History, Technology and Conservation: Proceeding from the 2014 International Conference*. Washington, D.C. Édité par Malcolm Collum, Paul Mardikian, Joe Sembrat, et Lisa Young Claudia Chemello. Smithsonian Institution Scholarly Press, 2019. p. 87-95.
- Degrigny, C., et al. « Etude, Identification des objets en aluminium patrimoniaux et Classification de leurs formes de corrosion », unité de recherche de la Haute Ecole arc Conservation Restauration, Neuchâtel, 2018.
- Despland, C. « Identification des alliages d'aluminium d'objets ethnographiques et caractérisation de leurs produits de corrosion: analyse par voie électrochimique et par fluorescence X », Mémoire Bachelor, Haute Ecole arc Conservation Restauration, 2018. <http://doc.rero.ch/record/323166?ln=fr>.
- Fontaine, C. « Analyse qualitative par voie électrochimique des alliages à base d'argent: application de l'outil CLAMTEC à ce type de matériau », Mémoire Bachelor, Haute Ecole arc Conservation Restauration, 2012. <https://doc.rero.ch/record/277811>.
- Granget, E. « 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) », Mémoire Master, Haute Ecole arc Conservation Restauration, 2020. <http://doc.rero.ch/record/330131?ln=fr>.
- Granget, E. « L'outil DiscoveryMat transposé à la réalité d'un atelier de restauration Automobile: Caractérisation des alliages d'aluminium de circuits de refroidissement à eau d'un corpus de véhicules conservés au Musée National de l'Automobile de Mulhouse – Collection Schlumpf » Rapport de stage, Haute Ecole arc Conservation Restauration, 2019 non publié.
- Keller, R. et Garnier, P. Musée National de l'Automobile, Collection Schlumpf-Mulhouse, Strasbourg, Donon, 2012, 322 p.
- Poulain, Ph. et Poulain, J-M. Voitures de collection. Restauration mécanique, Collection Auto Savoir, Boulogne-Billancourt, ETAI, 1995, 294 p.
- Pourbaix, M. Atlas d'équilibres électrochimiques, Gauthier-Villars, Paris, 1963
- Vargel, C. La corrosion de l'aluminium, Paris, Dunod, 1999, 528 p.