

# DÉVELOPPEMENT DE MICORR COMME OUTIL PARTICIPATIF D'AIDE AU DIAGNOSTIC DES MÉTAUX PATRIMONIAUX

CHRISTIAN DEGRIGNY<sup>1</sup>, PHILIPPE DILLMANN<sup>2,4</sup>, CÉDRIC GASPOZ<sup>3</sup>,  
DELPHINE NEFF<sup>4</sup>, MARION BERRANGER<sup>2</sup>, BERNARD LETOURMY<sup>3</sup>,  
NAÏMA GUTKNECHT<sup>1</sup>

1 - Haute Ecole Arc  
Conservation-restauration  
(HE-Arc CR), University of  
Applied Sciences and Arts  
Western Switzerland, Espace  
de l'Europe 11,  
2000 Neuchâtel, Suisse,

christian.degrigny  
@he-arc.ch

2 - CNRS Laboratoire  
métallurgies et cultures  
IRAMAT – Université  
Technologique de Belfort-  
Montbéliard (UTBM), Campus  
de Sévenans, 90010 Belfort  
Cedex, France

3 - Laboratoire  
archéomatériaux et prévision  
de l'altération (LAPA) -  
Université Paris-Saclay,  
Centre d'études atomiques  
Saclay,  
91191 Gif sur Yvette Cedex,  
France

4 - Haute Ecole Arc Gestion  
(HEG-Arc), University of  
Applied Sciences and Arts  
Western Switzerland, Espace  
de l'Europe 11,  
2000 Neuchâtel, Suisse

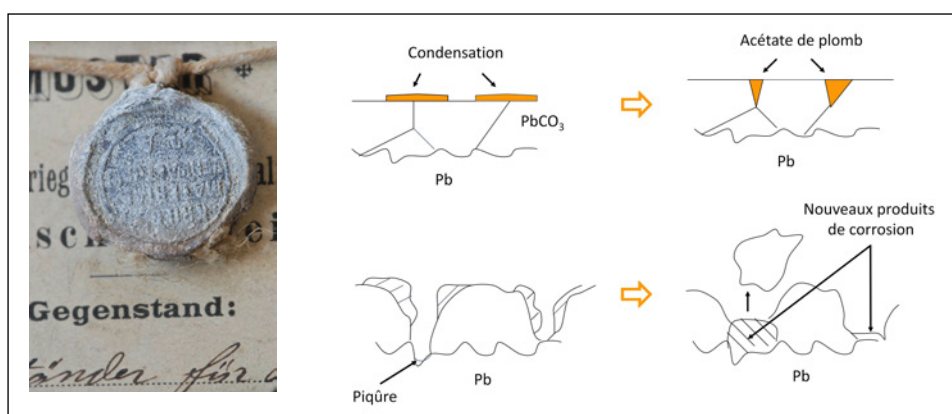
## INTRODUCTION

L'expérience et l'expertise des professionnels de la conservation-restauration facilitent la reconnaissance, voire l'identification, d'un métal patrimonial à partir de ses caractéristiques physiques et des formes de corrosion qu'il développe. Ainsi, un métal base fer est normalement magnétique alors qu'un objet en alliage d'aluminium est plus léger que son équivalent réalisé dans un autre métal. Un alliage d'argent se ternit (irisation de surface), un objet base fer se couvre d'oxydes brun-orangé souvent volumineux et celui base cuivre d'oxydes bruns peu épais a priori stables, voire d'efflorescences bleu-vert révélant une certaine instabilité. Les métaux archéologiques présentent, quant à eux, d'épaisses couches de corrosion rendant difficile la reconnaissance du métal sous-jacent même si leurs couleurs caractéristiques peuvent orienter l'identification de ceux-ci : brun-orange pour les alliages base fer, gris-blanc pour les alliages base plomb-étain et bleu-vert pour les alliages base cuivre.

Le diagnostic qui découle de ces observations préliminaires est approximatif. Les mécanismes de corrosion publiés permettent de le compléter. On peut ainsi expliquer l'altération du sceau en plomb de la figure 1, conservé dans une armoire en chêne dégageant des vapeurs organiques corrosives, selon le mécanisme publié par Turgoose (Turgoose 1985). Il apparaît que les anciennes couches de corrosions sont soulevées par la formation de nouvelles qui induisent de ce fait la perte de la surface d'origine. Le processus est actif.

Toutefois, les mécanismes de corrosion publiés ne prennent pas en compte la spécificité de chacun des alliages constituant les objets patrimoniaux. Aussi, des analyses complémentaires doivent être réalisées afin d'adapter les mécanismes connus

**Fig. 1:** Sceau en plomb attaché à l'objet qu'il authentifie par des lacs en chanvre, collection Stiftung HAM, crédit A. Tarchini (à gauche) et mécanisme de la corrosion active du plomb en présence de vapeurs d'acide acétique (lecture de haut à gauche en bas à droite), selon Turgoose (à droite)



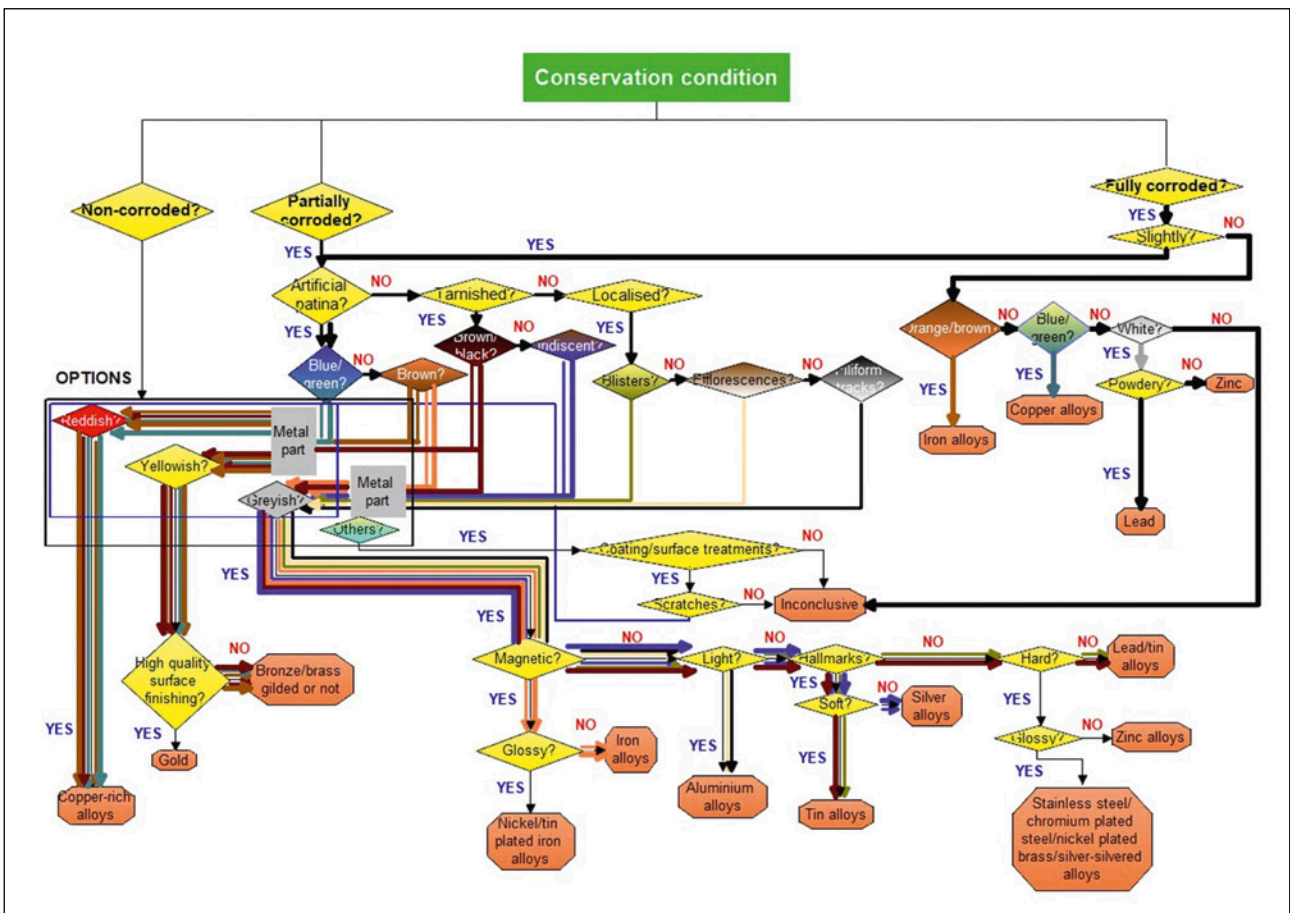
aux multiples matériaux étudiés. Les examens non invasifs (donc sans prélèvement) et menés in-situ à l'aide d'outils portables sont préconisés. L'instrumentation existante est coûteuse et souvent hors de portée des conservateurs-restaurateurs.

## L'APPLICATION MICORR

C'est afin de répondre à ce besoin d'un meilleur diagnostic des métaux patrimoniaux à moindre coût que l'application MiCorr a été développée (Degrigny et al. 2016, 2020, 2021a et 2021b). L'aide au diagnostic se base sur la combinaison d'observations macroscopiques et d'examen microscopiques, sous binoculaire et sur coupe, rassemblés sous la forme de structures de corrosion numériques et la comparaison de ces dernières à celles d'une base de données. Si elle doit bénéficier principalement aux professionnels de la conservation-restauration, elle profite de l'expertise de communautés aussi diverses que celles des responsables de collections, des conservateurs-restaurateurs, des chercheurs en conservation et des archéométallurgistes. Chacun contribue à la pertinence des trois moteurs de recherche développés (par mots clés, par observation macroscopique et par représentation stratigraphique) et à l'enrichissement de la base de données sur laquelle se base l'aide au diagnostic.

**Fig. 2:** Première version de la chaîne décisionnelle devant permettre la mise en place du moteur de recherche par observation macroscopique pour l'identification des métaux patrimoniaux

L'application est en anglais afin de lui permettre une diffusion internationale. Dans la suite, nous nous concentrons plus spécifiquement sur les deux derniers moteurs de recherche.



## LE MOTEUR DE RECHERCHE PAR OBSERVATION MACROSCOPIQUE

Celui-ci répond à un besoin clairement affiché par les responsables de collection d'identifier au mieux le métal constitutif d'un objet patrimonial à partir de ses caractéristiques propres. Une chaîne décisionnelle (Fig. 2) a été établie partant de l'aspect général de la surface du métal étudié (corrodé ou non). Si le métal est non corrodé, l'utilisateur est interrogé sur les propriétés physiques de celui-ci. S'il est corrodé, ce même utilisateur doit commencer par préciser les formes de corrosion observées avant de décrire les caractéristiques du métal résiduel. Au final, l'utilisateur se voit proposer des familles de métaux répondant aux observations / examens effectués. Il peut, s'il le souhaite, consulter des fiches descriptives rassemblant l'ensemble des caractéristiques des familles de métaux considérées pour valider ou rejeter les hypothèses formulées.

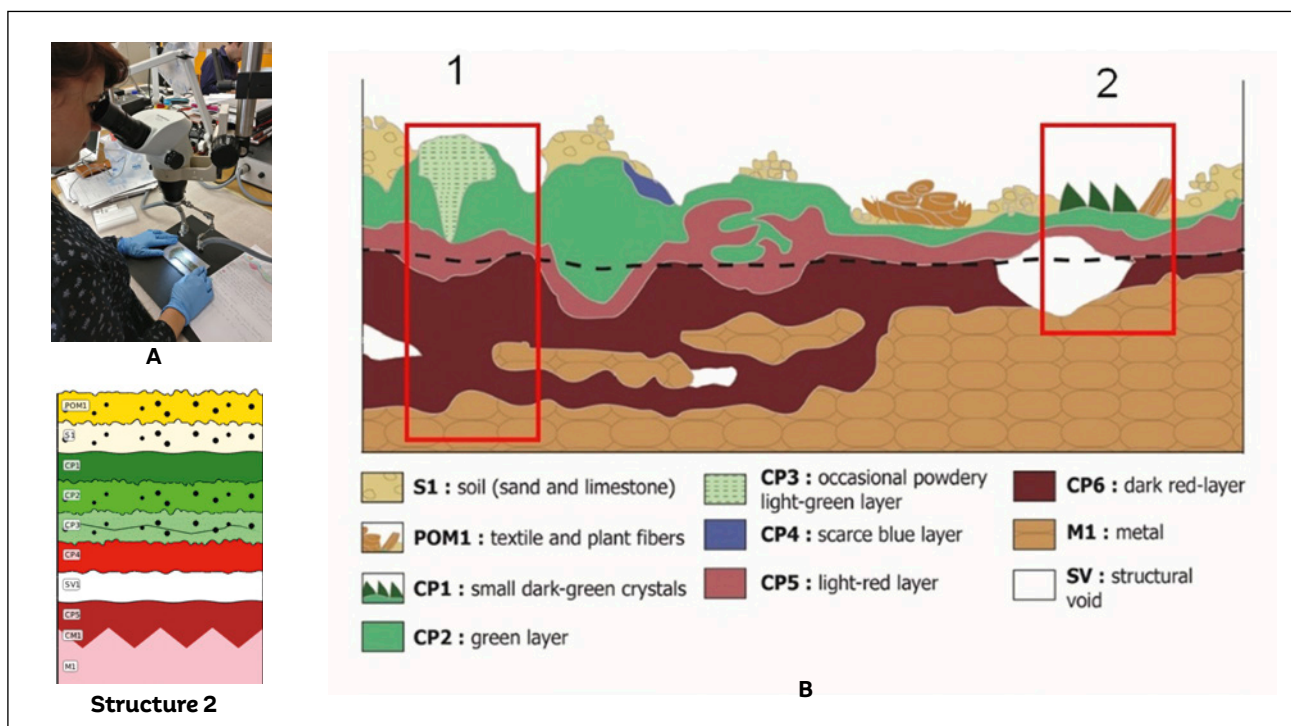
L'outil Figma ([www.figma.com](http://www.figma.com)) a été utilisé pour développer une version illustrée et conviviale de la chaîne décisionnelle, véritable prototype du prochain moteur de recherche. Sa transcription en langage informatique permettra son intégration à l'application MiCorr.

## LE MOTEUR DE RECHERCHE PAR REPRÉSENTATION DES STRATIGRAPHIES

Ce moteur de recherches s'inspire de l'approche habituelle suivie par les conservateurs-restaurateurs lorsqu'ils diagnostiquent les objets étudiés sous binoculaire afin de préciser les structures de corrosion développées. Elle se base sur 4 étapes : l'observation sous binoculaire d'un objet et la représentation schématique des structures de corrosion développées, la construction d'une stratigraphie numérique représentative via l'application MiCorr, sa comparaison à celles des entrées de la base de données de MiCorr et la consultation des informations relatives aux structures de corrosion retenues de cette même base de données pour affiner le diagnostic sur l'objet étudié.

Pratiquement, l'observation sous binoculaire (Fig. 3a, ici un Tumi – couteau sacrificiel. Museum der Kulturen, Bâle) s'accompagne du dégagement local et progressif, par un professionnel de la conservation-restauration, des strates en place

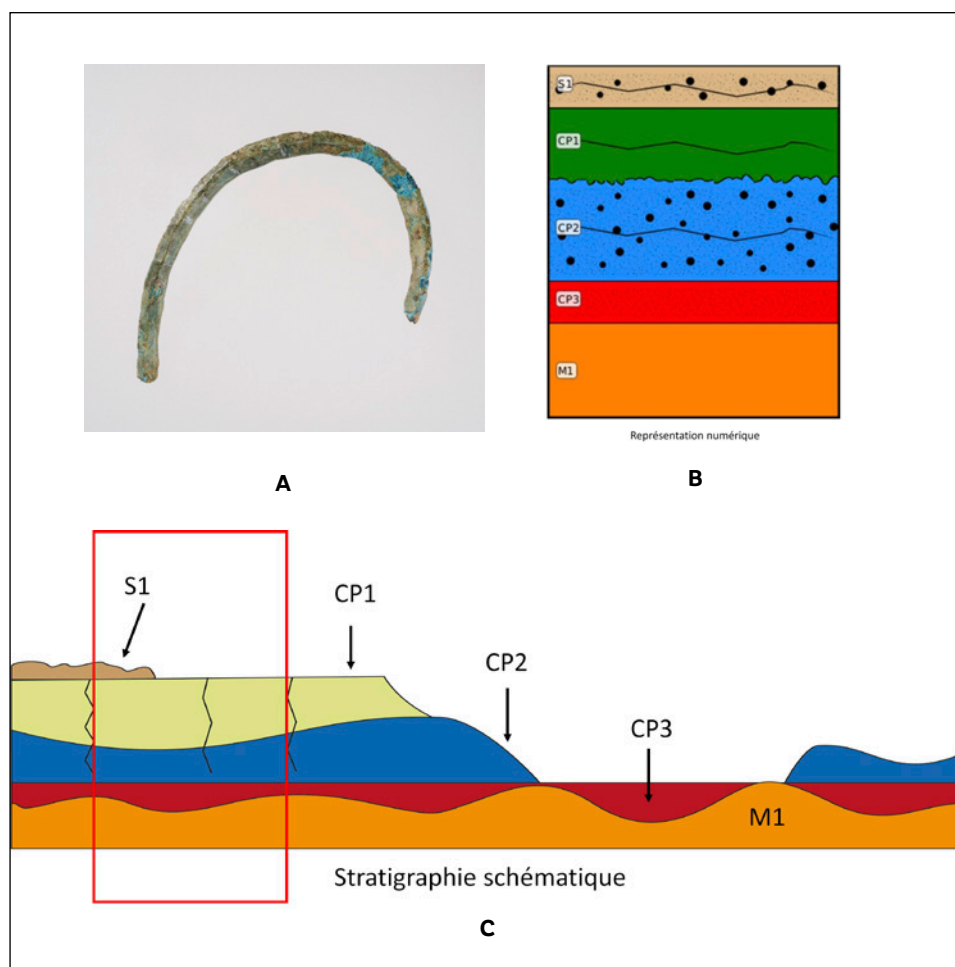
**Fig. 3:** Les étapes de la représentation numérique d'une structure de corrosion (ici structure 2) à partir de l'observation d'un objet sous binoculaire (a) et de la représentation schématique des structures de corrosion en place (b)



avec un scalpel, permettant de bien comprendre les structures de corrosion de l'objet et de les dessiner depuis les strates les plus externes jusqu'au métal résiduel (Fig. 3b). La structure de corrosion jugée la plus représentative (ici la structure 2) est ensuite construite numériquement via le moteur de recherche en utilisant l'assemblage de strates et le système de codification (M: métal résiduel, CP: couches de corrosion, CM: métal corrodé, SV: vide structurel, S: sédiment et POM: pseudomorphe de matériau organique (Fig. 3c) développés par R. Bertholon (Bertholon 2001). Les caractéristiques (morphologie, texture, microstructure, composition, interface entre strates) de chaque strate sont documentées.

Les entrées de la base de données de MiCorr sont des objets présentant des altérations couramment rencontrées sur les métaux patrimoniaux comme l'ébauche de bracelet en alliage base cuivre du site de Bussy / Pré de Fond du 1<sup>er</sup> Âge du Fer, situé dans l'État de Fribourg (Fig. 4a). Bien que le profil de l'objet soit proche de celui d'origine,

**Fig. 4:** Ébauche de bracelet du site de Bussy / pré de Fond, crédit SAEF (a), stratigraphie schématique des structures de corrosion (c) et représentation numérique (b)

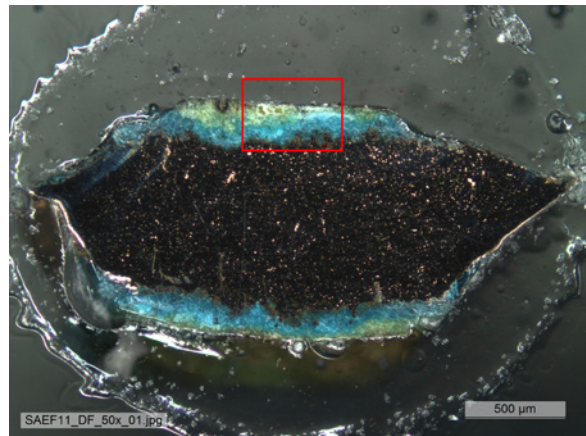


sa surface apparaît fragile et s'est en partie délitée. Le conservateur-restaurateur identifie sous binoculaire les strates constituant les structures de corrosion observées, qu'il représente schématiquement (Fig. 4b) afin de retenir celle qui lui paraît être la plus représentative (cadre rouge). Il reste alors à la reconstruire numériquement (Fig. 4c).

Les responsables de l'objet ayant donné leur autorisation pour qu'un prélèvement soit effectué, celui-ci est choisi judicieusement (Fig. 5a), enrobé et observé en coupe (Fig. 5b). La zone la plus représentative (cadre rouge) est analysée plus spécifiquement (Figs. 5c et 5d), ce qui permet de construire une représentation numérique de la coupe (Fig. 5e).

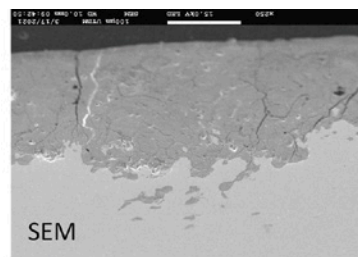


A

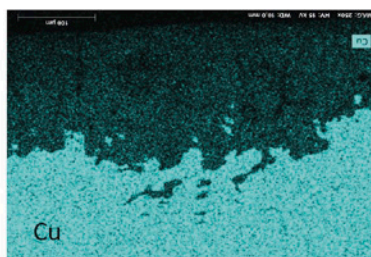


Microscopie optique, champ sombre

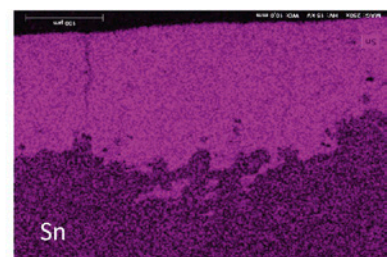
B



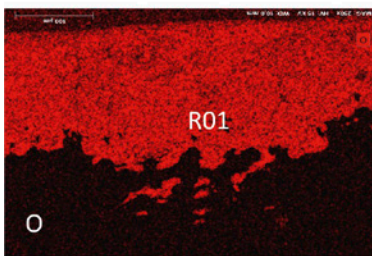
SEM



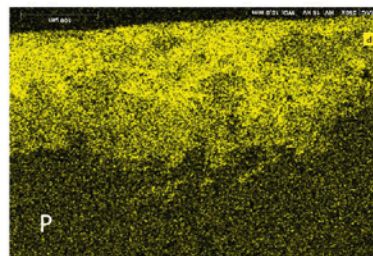
Cu



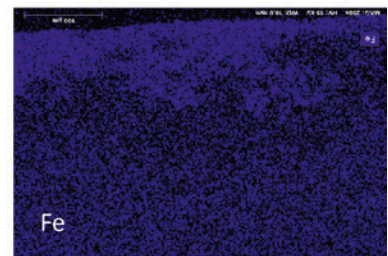
Sn



O

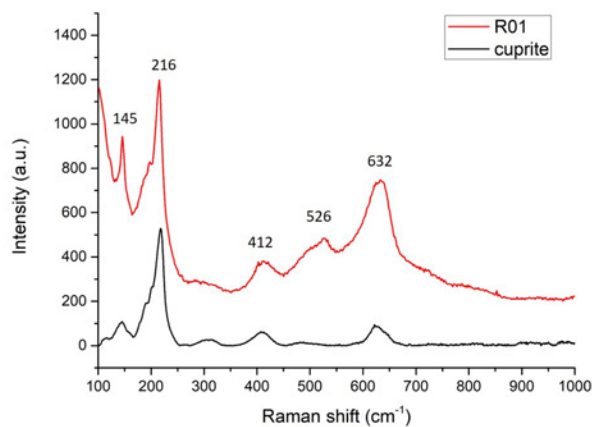


P

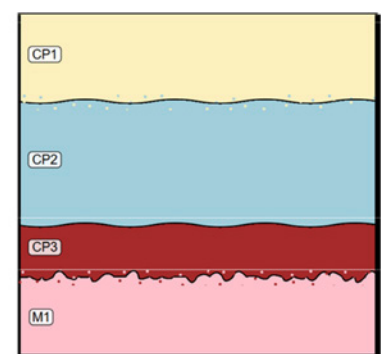


Fe

C



D



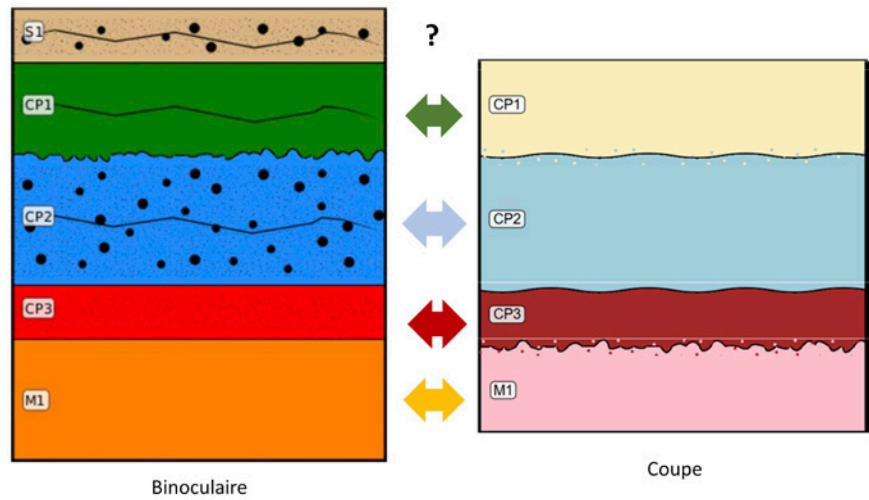
Représentation numérique

E

**Fig. 5:** Localisation du prélèvement effectué sur l'ébauche de bracelet du site de Bussy / pré de Fond (a), observation de la coupe et sélection d'une zone représentative (b) pour analyses élémentaires par spectroscopie en dispersion d'énergie combinée à la microscopie électronique à balayage (c) ainsi que  $\mu$ -Raman (d) et représentation numérique déduite (e)

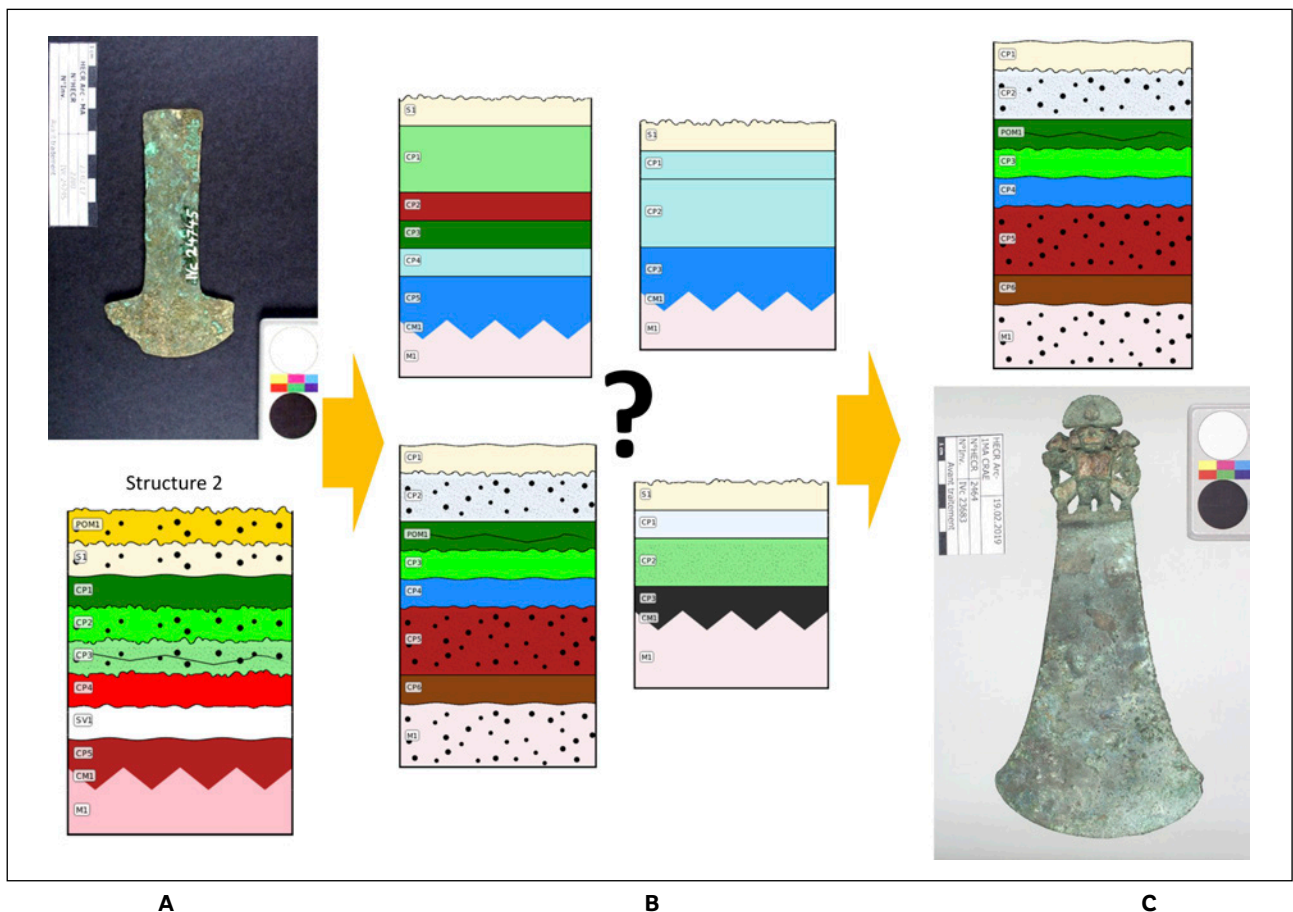
Les deux représentations numériques obtenues selon les deux modes d'observation sont mises en parallèle afin d'établir des correspondances (Fig. 6) permettant, lors du diagnostic, de faire le lien entre les examens de surface (sous binoculaire) et ceux réalisés au cœur du matériau (sur coupe).

**Fig. 6:** Comparaison des représentations numériques de structures de corrosion sur l'ébauche de bracelet du site de Bussy / pré de Fond obtenues selon les deux modes d'observation

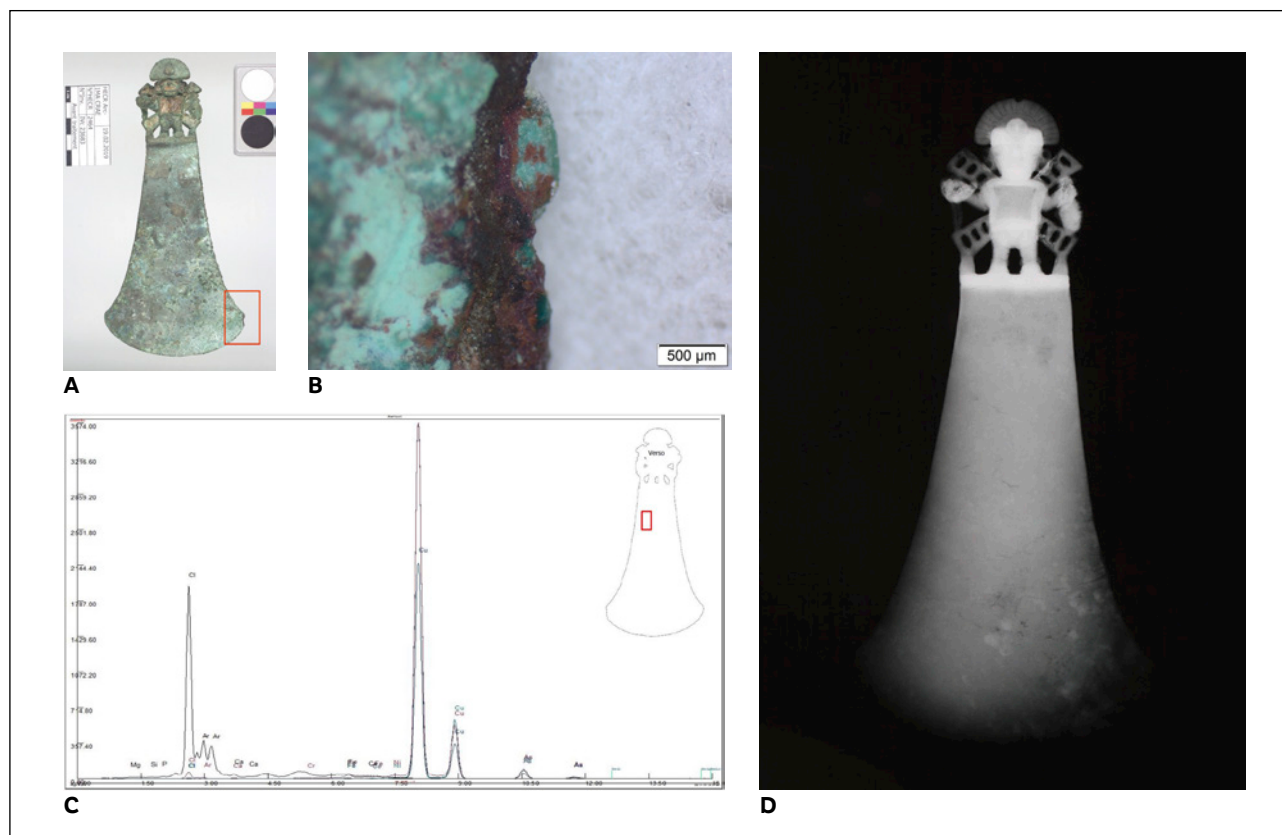


**Fig. 7:** Comparaison de la représentation numérique de la structure de corrosion 2 du Tumi de la Figure 3c (a) à celles de certaines entrées de la base de données (b) et sélection, au sein de cette dernière, de la représentation numérique la plus proche correspondant à un autre Tumi (c), crédit HE-Arc CR

Si on revient à la représentation numérique de la structure de corrosion 2 du Tumi (Figs. 3 et 7a) déduite de l'observation sous binoculaire, des similitudes sont établies via l'application MiCorr avec d'autres représentations numériques de structures de corrosion de la base de données (Fig. 7b), obtenues soit sous binoculaire ou en coupe, la meilleure étant celle d'un autre Tumi du même musée (Museum der Kulturen, Bâle, Fig. 7c). Ces similitudes se basent sur le nombre de strates des structures de corrosion, leurs natures, leurs caractéristiques et leur arrangement.



L'utilisateur peut alors consulter la fiche objet du Tumi sélectionné (Fig. 8). Alors que son approche sur le Tumi étudié n'a été que micro-invasive, il accède, grâce à la base de données, à des informations sur une structure de corrosion similaire à celle observée par lui-même (étendue de la corrosion, microstructure du métal résiduel, etc.) qui lui sont habituellement inaccessibles. Cette meilleure appréciation de l'impact, au cœur de la matière, de la corrosion observée lui permet ainsi d'affiner son diagnostic.



## MICORR : ÉTAT DES LIEUX ET IMPACT AUPRÈS DES PROFESSIONNELS

L'application MiCorr étant actuellement en développement, sa base de données est incomplète, ne couvrant qu'une fraction de la variété des formes de corrosion habituellement rencontrées sur les alliages base aluminium, cuivre, fer et zinc. De plus, certaines familles de métaux ne sont pas encore représentées (argent, étain, plomb, etc.). Aussi, l'interrogation de la base de données peut manquer de pertinence. L'enrichissement de celle-ci est possible et même encouragé, via des contributions des diverses communautés concernées.

Le développement de MiCorr repose largement sur la volonté des utilisateurs / contributeurs de partager leur savoir avec des tiers. Ainsi, les développeurs de l'application s'engagent sur le terrain à promouvoir l'application auprès des conservateurs-restaurateurs (Fig. 9a). Peu à peu, MiCorr s'implante dans les laboratoires de conservation-restauration, favorisant les échanges des professionnels impliqués dans la compréhension des formes de corrosion en place et la définition des protocoles de traitement qui en découle (Fig. 9b).

Malgré l'intérêt marqué pour MiCorr, qui complète une lacune du domaine, la base de données participative peine à s'enrichir. Il apparaît que les professionnels de la conservation-restauration, qui travaillent en flux tendu, hésitent à investir du temps, jugé trop important, pour se former à l'utilisation du moteur de recherche par

**Fig. 8 :** Données issues de la fiche objet du Tumi (IVc 23683) du Museum der Kulturen de Bâle: détail de la stratigraphie de la tranche (b) indiqué sur la vue d'ensemble par le cadre rouge (a), analyse élémentaire de surface en fluorescence X (c) montrant la présence potentielle de corrosion active (chlorures) et radiographie X indiquant une profonde altération du matériau au niveau de sa tranche, crédits HE-Arc CR



**A**



**B**

**Fig. 9 :** Échanges entre les développeurs et une conservatrice-restauratrice au sein d'un laboratoire de conservation-restauration (a) et entre professionnels d'un même laboratoire de conservation-restauration autour d'une représentation numérique d'une structure de corrosion (b)

représentation des stratigraphies et pour contribuer à la base de données, limitant de fait la pertinence de celle-ci.

Sur la base de ce constat, nous avons soumis un projet au programme européen de coopération transfrontalière Interreg V France-Suisse 2014–2020 qui a été retenu. Il permet d'intégrer 23 acteurs de terrain de la région Interreg dans notre démarche par la prise en charge (financière) de leur contribution (Fig. 10). Si la grande majorité des acteurs de terrain enrichissent la base de données de MiCorr au travers de structures de corrosion observées sous binoculaire, leur examen analytique (sur coupe lorsque c'est possible) est pris en charge par les partenaires du projet (HE-Arc CR, LMC-IRAMAT et LAPA). Ce projet a démarré en 2020 et se poursuit jusqu'à la fin de l'année 2022.

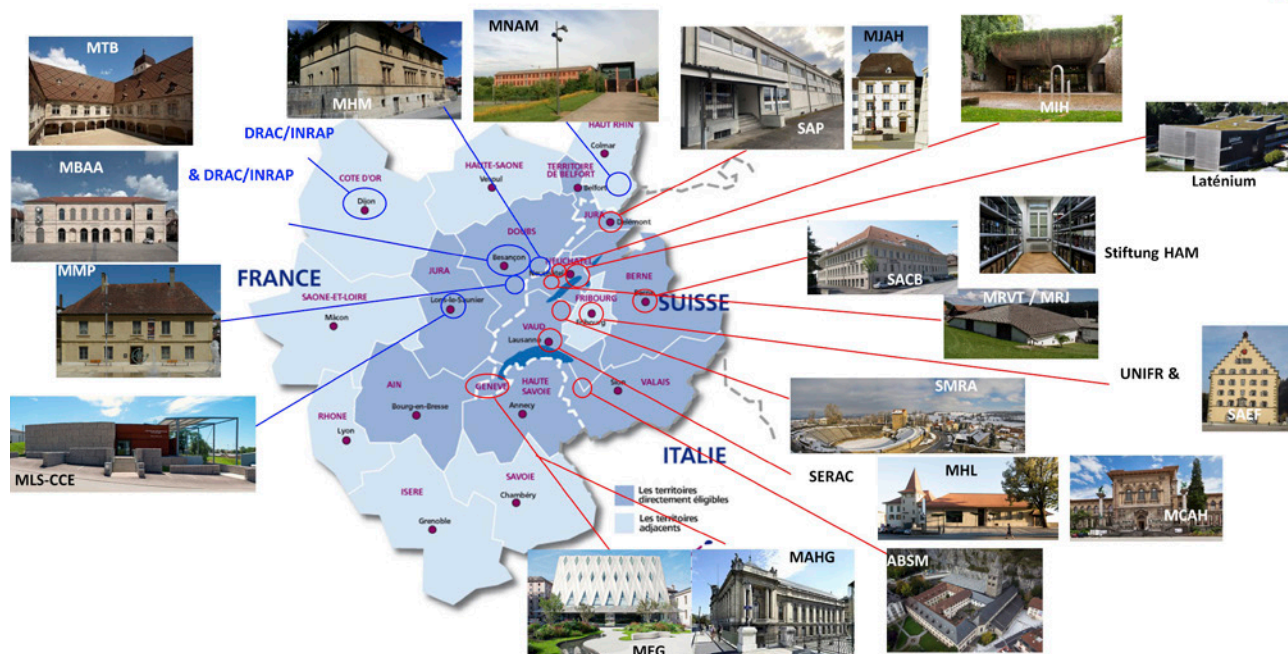
## CONCLUSION

L'application MiCorr initiée par la communauté des conservateurs-restaurateurs rassemble désormais des contributions d'autres communautés lui permettant de répondre à des besoins élargis sur le diagnostic des métaux patrimoniaux. De l'avis des contributeurs actuels de MiCorr, l'application devrait devenir un de ces outils interdisciplinaires permettant l'échange et la diffusion de connaissances rarement rassemblées sur un même support. Son évolution comme outil participatif devrait lui permettre de se développer plus vite et de gagner en pertinence, étapes essentielles pour assurer sa pérennité.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient pour leur soutien financier le programme européen de coopération transfrontalière Interreg V France-Suisse 2014–2020 (financement du Fonds européen de développement régional (FEDER-EUR 186 599) et des cantons de Berne, du Jura, de Neuchâtel, du Valais et de Vaud (EUR 90 830)) ainsi que la Communauté du Savoir (EUR 5000). Le travail réalisé n'aurait pas été possible sans la contribution active des acteurs de terrain du projet MetalPAT que nous remercions chaleureusement.





**Fig. 10 :** Localisation des acteurs de terrain engagés dans le projet MetalPAT du programme européen de coopération transfrontalière Interreg V France-Suisse 2014–2020 (ABSM: Abbaye de Saint-Maurice, DRAC: Direction Régionale des Affaires Culturelles Bourgogne – Franche Comté; INRAP: Institut National de Recherches en Archéologie Préventive; Laténium: Parc et musée d’archéologie de Neuchâtel; MAHG: Musée d’art et d’histoire de Genève; MBAA: Musée des Beaux-Arts et d’Archéologie de Besançon; MCAH: Musée cantonal d’archéologie et d’histoire de Lausanne; MEG: Musée d’ethnographie de Genève; MHL: Musée historique Lausanne; MHM: Musée d’Horlogerie de Morteau; MIH: Musée international de l’horlogerie de la Chaux-de-Fond; MJAH: Musée jurassien d’art et d’histoire, Delémont; MLS-CCE: Musée de Lons-le-Saunier - Centre de conservation et d’études; MMP: Musée Municipal de Pontarlier; MNAM: Musée National de l’Automobile de Mulhouse; MRJ: Musée Rural Jurassien Les Genevez; MRVT: Musée Régional du Val de Travers; MTB: Musée du Temps de Besançon; SAEF: Service Archéologique de l’Etat de Fribourg; SAP: Section d’archéologie et paléontologie du Jura, Delémont; SACB: Service Archéologique du Canton de Berne; SERAC: Service des Affaires Culturelles de Lausanne; SMRA: Site et Musée romains Avenches; Stiftung HAM: Fondation matériel historique de l’armée suisse, Thoune; UNIFR: Université de Fribourg).



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bertholon R., « Characterization and location of the original surface of corroded archaeological objects », *Surface Engineering*, 17 (3), 2001, 241-245.
- Degriigny C., Dillmann P., Gaspoz C. and Neff D., Exploitation and dissemination of MiCorr as a diagnostic support tool for heritage metals, *Conservation 360°* (in press), 2022.
- Degriigny C., Dillmann P., Gaspoz D., Neff D., Berranger M., Letourmy B., Gutknecht N., « Analyse et diagnostic des métaux patrimoniaux – Possibilités et limites des outils numériques en libre accès et participatifs », *DigiArch 2021 – Patrimoine culturel à l'ère numérique*, Schwabe Basel, 2021b, 66-69.
- Degriigny C. et Gaspoz C., « Un outil d'aide au diagnostic et de partage de savoir sur les métaux archéologiques », *Cahier Technique de l'Araafu*, 26, 2020, 115-122.
- Degriigny C., Gaspoz C., Rosselet A., Boissonnas V., Jeanneret R. and Bertholon R., « The MIFAC-Metal Online project: developing a Decision Support System for locally invasive diagnosis of heritage metals », *MÉTAL 2016*, proceedings of the ICOM-CC Metal WG interim meeting, eds. R. Menon, C. Chemello and A. Pandya, New Delhi, (India), 2016, 220-227.
- Turgoose S., « The corrosion of lead and tin: before and after excavation », *Lead and Tin: Studies in Conservation and Technology*, ed. C.E. Miles and S.C. Pollard, UKIC Occasional papers, n°3, London, 1985, 15-26.

