

— SageX n° 38996 —

MIFAC-MÉTAL *ONLINE*
UN SIAD POUR LE DIAGNOSTIC SUR DES MÉTAUX
PATRIMONIAUX ET INDUSTRIELS

Rapport scientifique final



MICORR

Microstructure and corrosion
of metals database

TABLE DES MATIÈRES

1. Volet scientifique	3
1.1. Contexte et cadre général de la recherche	3
Description	3
Contexte.....	3
1.2. Objectifs annoncés et résultats obtenus	4
Objectif général.....	4
Objectifs scientifiques	4
Résultats scientifiques	4
Objectifs techniques.....	8
Résultats	9
1.3. Description des livrables.....	10
Livrables scientifiques	10
Livrables techniques	11
1.4. Valeur ajoutée, pertinence des résultats obtenus	13
1.5. Degré d'innovation par rapport à l'état de l'art	13
1.6. Lien du projet avec la stratégie du domaine de recherche	13
Dimension internationale.....	13
Impact régional de la Ra&D	14
Diversification des sources de financement de recherche	14
Valorisation des résultats de la Ra&D.....	14
Relève scientifique dans les écoles	14
2. Volet économique	14
2.1. Valorisation des résultats	14
2.2. Valeur ajoutée, pertinence des résultats obtenus	14
2.3. Communication des résultats	15
3. Volet pédagogique.....	15
3.1. Valorisation pour l'enseignement	15
3.2. Partenariat avec d'autres hautes écoles	15
3.3. Collaboration à la mise sur pied de cours postgrades	15
4. Annexes.....	15
Collaborateurs.....	15
Bibliographie	16

1. VOLET SCIENTIFIQUE

1.1. Contexte et cadre général de la recherche

DESCRIPTION

MiCorr¹ est un projet de recherche qui a débouché sur la mise en ligne d'une plate-forme d'aide à l'analyse et au diagnostic d'objets métalliques patrimoniaux ou industriels, sans prélèvement invasif. Ceux-ci se caractérisent par des faciès de corrosion qu'on peut représenter sous la forme de superpositions de strates, appelées stratigraphies dans la suite, et incluant le métal lui-même, sa partie corrodée et les strates supérieures dont les produits de corrosion et les sédiments déposés en surface. Le projet s'est déroulé en trois grandes étapes qui ont produit des résultats tant scientifiques que pratiques. La première étape a consisté à créer un modèle numérique permettant de représenter l'ensemble des caractéristiques des strates d'une stratigraphie ainsi que leurs attributs dans une base de données en graphe. La seconde étape s'est concentrée sur la transformation de graphes de stratigraphies en modèles graphiques de stratigraphies pouvant être interprétés par les conservateurs-restaurateurs. Finalement, la dernière étape s'est intéressée à la construction de stratigraphies de matériaux inconnus et à la comparaison de celles-ci avec celles de modèles de corrosion existant, que ce soit sous forme textuelle ou à l'aide des graphes. Les résultats actuels de ce projet sont intégrés dans le site web <http://micorr.org> devant servir d'aide au diagnostic auprès des professionnels industriels et de la conservation-restauration et/ou ont été publiés dans des conférences et journaux académiques.

Le projet MiCorr s'est déroulé d'août 2014 à janvier 2016, soit une durée de 18 mois.

CONTEXTE

La bonne compréhension de l'altération des métaux patrimoniaux et industriels permet de supprimer, limiter ou au moins ralentir les processus de corrosion en cours. Si dans le domaine de la corrosion industrielle la prise d'échantillon pour examiner le niveau d'altération constaté ne pose pas de problème particulier, les experts s'accordent pour indiquer la limite de cette approche qui couvre des phénomènes d'altération spécifiques à certains dommages liés à des sollicitations (contraintes mécaniques cycliques, exposition à haute température ou à des gaz sous pression) non rencontrées sur les métaux patrimoniaux. De plus, ces altérations ne correspondent pas toujours à des dommages formés sur de longues périodes de sollicitation ou d'exposition et ne permettent pas de faire des prévisions de tenue des matériaux à long terme.

L'examen des métaux patrimoniaux peut ici apporter certains éclairages même si contrairement aux métaux industriels, tout objet patrimonial est unique de par sa composition et son état de conservation. Lors d'un traitement de conservation-restauration sur un tel objet on s'attache à effectuer le diagnostic le plus juste possible afin que l'intervention réalisée réponde au mieux au problème posé. Ce diagnostic requiert une description précise de la surface (ou constat d'état) de l'objet considéré. La méthode descriptive de la corrosion basée sur la représentation schématique de la superposition des strates présentes (métal résiduel, couches de corrosion, lacunes...) est considérée aujourd'hui comme la plus aboutie (Bertholon, 2001). Sur cette base et à partir des modèles de corrosion publiés dans les journaux spécialisés (Corrosion Science, Studies in Conservation...), le conservateur-restaurateur essaie de trouver des similitudes qui lui permettent d'associer les résultats de son observation aux altérations déduites des

¹ Dans le présent rapport, nous utilisons le nom **MiCorr**, qui est le nom du produit final de ce projet, en lieu et place de l'acronyme **MIFAC-Métal *Online***.

modèles de corrosion consultés. De là il en conclue que l'objet considéré est ou non le siège d'un des modèles de corrosion pressentis.

Des équipes pluridisciplinaires ont tenté de développer des bases de données regroupant des informations de diagnostic sur du matériel patrimonial corrodé. Force est de constater qu'il est très difficile de faire des correspondances (« matching ») entre des faciès de corrosion observés directement à la surface des objets étudiés et des modèles de corrosion déjà identifiés et stockés dans des référentiels. Les raisons en sont d'un côté le manque de standardisation de la description de la surface des objets (chaque conservateur-restaurateur voit, selon son expérience, l'objet différemment) et la grande hétérogénéité de surface des métaux patrimoniaux pouvant induire des descriptions antinomiques sur des zones très restreintes et de l'autre des modèles de corrosion aux données partielles du fait de l'utilisation, par les équipes de chercheurs, de techniques d'analyse différentes pour décrire les types de corrosion et les couches de corrosion formées.

Grâce à l'intégration d'un modèle numérique, d'un générateur de visualisation ainsi que d'un moteur de comparaison de graphes, ce projet permet maintenant aux conservateurs-restaurateurs ainsi qu'aux industriels de créer des stratigraphies selon une méthodologie découlant directement des travaux de recherche de Bertholon (2000) et d'utiliser ces stratigraphies pour générer des représentations graphiques. L'application MiCorr permet par ailleurs de comparer les résultats obtenus à ceux de modèles de corrosion existant et reflétant l'état de l'art. Ainsi, le praticien dispose d'un outil d'aide au diagnostic lui permettant d'appréhender au mieux le faciès de corrosion qu'il étudie, sans prélèvement, et de mettre en place des stratégies d'intervention.

1.2. Objectifs annoncés et résultats obtenus

OBJECTIF GÉNÉRAL

Développement d'un prototype innovant facilitant le diagnostic sur l'état de conservation d'objets métalliques.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Le premier objectif scientifique de ce projet est de mettre en commun des connaissances scientifiques dispersées entre plusieurs communautés et de favoriser la collaboration entre ces divers acteurs. Les observations collectées par l'ensemble de ces communautés scientifiques permettront à ce système auto-apprenant de devenir toujours plus efficient dans son processus d'aide au diagnostic.

Le second objectif scientifique vise à assoir, au niveau international, l'expertise unique des chercheurs de la Haute Ecole Arc Conservation-restauration – HE-Arc CR, partenaire du projet, et permettra d'initier de nouvelles problématiques de recherche actuellement très cloisonnées et de portées restreintes. La mise en place, via le projet, de réseaux participatifs, étendra le champ de compétences de la HEG-Arc.

RÉSULTATS SCIENTIFIQUES

La particularité du projet et l'importance de l'interdisciplinarité qui est au cœur de la réalisation des objectifs. Pour les atteindre, nous avons travaillé en trois étapes : le modèle de données, la visualisation et la recherche de similitudes.

Etant donné l'importance d'une identification correcte des matériaux composant les objets patrimoniaux, les conservateurs-restaurateurs ont développé des méthodes de travail permettant d'étudier et de documenter les produits de corrosion trouvés sur ces objets. Celle développée par Bertholon consiste à

modéliser les faciès de corrosion sous la forme de strates superposées et aux caractéristiques propres. La difficulté de cette première étape a été de trouver un moyen de stocker ces informations dans un modèle numérique de données permettant, pour chaque strate et stratigraphie, de capturer l'ensemble des caractéristiques observables par le conservateur-restaurateur.

Une recherche extensive de la littérature nous a permis de retenir un ensemble de 523 caractéristiques pouvant être appliquées à des couches de corrosion. On compte 220 caractéristiques principales et 303 sous-caractéristiques ou attributs des caractéristiques principales. Ces caractéristiques ont ensuite été groupées de manière hiérarchique par familles et sous-familles. Chaque famille possède une description, des indices de comparaison, une ou plusieurs catégories d'attributs, un attribut indiquant la cardinalité avec les couches de corrosion, ainsi qu'une liste des relations (inclusions et exclusions) entre les caractéristiques et les familles.

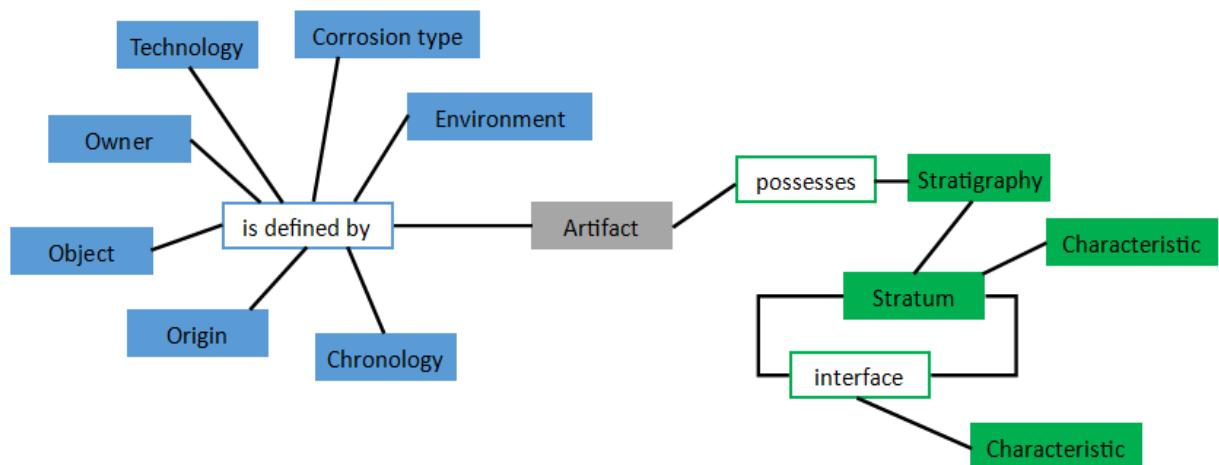


Figure 1: Représentation conceptuelle du modèle numérique de MiCorr

Le modèle numérique nous permet, pour chaque artefact, outre des informations d'identification, de représenter les stratigraphies, les strates ainsi que leurs caractéristiques, et les interfaces entre les strates, également avec leurs caractéristiques (Figure 1).

Tableau 1: Définition des concepts clé du modèle numérique

Concept	Définition
Stratigraphy	La stratigraphie est une représentation schématique des couches de corrosion de l'objet étudié.
Stratum	La strate (strata ou stratum au pluriel) représente une couche de corrosion de l'objet. Une strate peut elle-même contenir d'autres strates.
Characteristic	Une caractéristique (ou marquer) est liée à une strate. La caractéristique indique une propriété de la couche observée.
Interface	Une interface représente la surface entre deux strates. Elle possède des caractéristiques particulières.

A l'aide de ce modèle, le conservateur-restaurateur peut, pour une couche de corrosion particulière, représenter l'ensemble des caractéristiques, groupées par familles et sous-familles. La formalisation des relations entre les caractéristiques permet en outre de déterminer les caractéristiques compatibles entre elles ainsi que celles qui s'excluent, permettant de réduire l'ensemble des possibilités durant la construction de la stratigraphie (*decision tree pruning*).

Etant donné la structure du modèle numérique, ce dernier a été implémenté dans une base de données en graphe, dont les nœuds représentent les concepts clés de notre modèle (Tableau 1). D'un point de vue pratique, c'est la base Neo4j qui a été utilisée pour déployer le modèle (Figure 2).

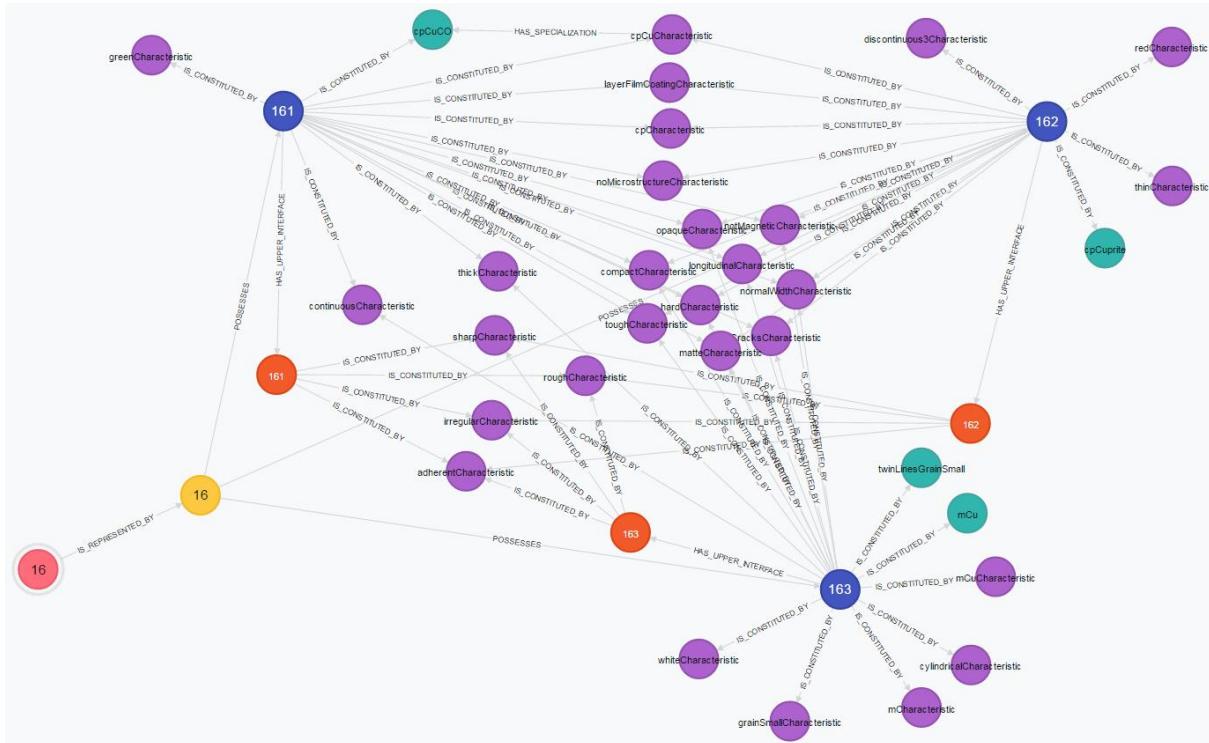


Figure 2: Représentation d'une stratigraphie dans Neo4j

Finalement, l'implémentation du modèle numérique dans la base de données a été évaluée en termes de complétude par rapport au modèle littéral (la version papier) ainsi qu'en termes de validité des résultats retournés lors de la comparaison de stratigraphies semblables. Pour tester la complétude de l'implémentation du modèle (modèle digital), nous avons vérifié qu'il permettait bien de représenter l'ensemble des caractéristiques présentes dans le modèle littéral. Le tableau ci-dessous (Tableau 2) montre les résultats obtenus au terme de cette première évaluation. Nous comparons les caractéristiques selon le fait qu'elles soient existantes ou non existantes dans le modèle littéral, avec leur représentation ou leur absence de représentation dans le modèle digital. Nous constatons que sur les 606 caractéristiques du modèle littéral, 514 ont été correctement implémentées dans le modèle digital, alors que 9 erreurs ont été introduites dans le modèle digital, sans correspondance dans le modèle littéral.

Tableau 2 Evaluation du modèle digital

		Modèle digital		
		Représenté	Non représenté	Total
Modèle littéral	Existant	514 (correct)	92 (manquant)	606
	Non existant	9 (erreur)	N/A	9
	Total	523	92	

Le second test a consisté à générer des stratigraphies à l'aide du modèle digital, puis à comparer les données de ces modèles en termes de proximité des caractéristiques utilisées. Pour ce faire, nous avons utilisé des requêtes Cypher afin de comparer les artefacts entre eux. Le premier test a consisté à comparer un artefact avec lui-même pour tester que la correspondance était bien de 100%. Les autres tests ont consisté à comparer un artefact à l'ensemble des artefacts disponibles dans le cadre du projet et à en déterminer la proximité. Le tableau ci-dessous (Tableau 3) montre le résultat de la comparaison d'un artefact avec certains artefacts retenus. Le résultat de ce second test est encourageant, car nous avons effectivement une grande proximité entre les artefacts 16, 17 et 5 alors que ce n'est pas le cas avec les artefacts 15 et 6. Il s'avère que les artefacts 15 et 6 étaient enfouis dans un milieu aquatique au lieu d'être enfouis dans le sol. Cette différence implique des formes de corrosion totalement différentes alors que le

métal peut être le même. Actuellement, il n'est pas possible d'améliorer ces résultats en raison de la trop petite quantité de stratigraphies stockées dans la base de données. Dès que la base de données s'étoffera, il sera possible d'améliorer l'algorithme de comparaison.

Tableau 3: Comparaison de l'artefact 13 avec les autres artefacts (extrait)

ID	# of strata	Difference # of strata	Total matching	Total relations	Matching100
artifact16	3	0	64	64	100%
artifact17	3	0	59	64	92%
artifact5	4	1	75	86	87%
artifact15	5	2	92	108	85%
artifact6	5	2	79	97	81%

La seconde étape s'est intéressée à la visualisation des stratigraphies à partir des caractéristiques des strates. Etant donné que nous avons créé un modèle numérique dans la première partie du projet, cette seconde partie a consisté à concevoir un moyen de représenter une partie des caractéristiques sous forme visuelle. Chaque caractéristique a été analysée afin de déterminer si elle devait être représentée graphiquement sur les stratigraphies. Certaines caractéristiques comme la couleur ou la surface sont aisément visualisables alors que des caractéristiques comme le type d'alliage ou la dureté ne le sont pas. Les caractéristiques devant être représentées graphiquement ont ensuite été analysées plus en détail afin de déterminer si la visualisation devait être basée sur un chablon ou pouvait être générée aléatoirement. Certaines formes de grains peuvent être générées aléatoirement (par exemple à l'aide d'un générateur de diagrammes de Vornoï) alors que les dendrites, qui présentent une forme et une disposition particulière, sont basées sur un chablon (Figure 3).

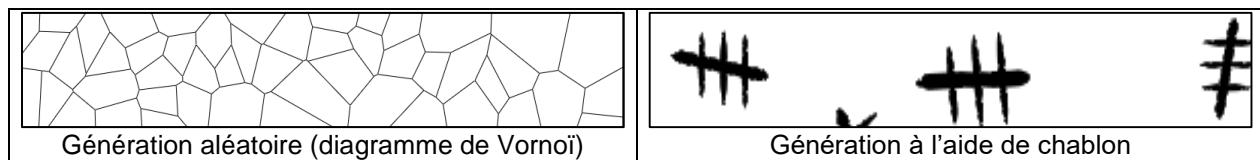


Figure 3: Différents types de génération de visualisation des caractéristiques

La version actuelle du modèle numérique permet la visualisation de 81 caractéristiques dont 24 à partir de chablons et 57 générées aléatoirement (Figure 4). La quantité importante de caractéristiques générées aléatoirement nous permet de mieux utiliser la surface de dessin afin de ne pas superposer les représentations des caractéristiques. Lors d'une prochaine itération, nous allons intégrer un moteur d'analyse de remplissage de la surface afin d'adapter également l'utilisation des chablons.

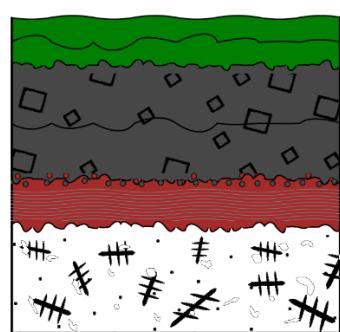


Figure 4: Exemple de stratigraphie

La troisième étape du projet s'est intéressée à la recherche de similitude entre les artefacts présents dans la base de donnée MiCorr, que ces similitudes soient basées sur des caractéristiques textuelles ou sur les stratigraphies. Nous avons vu précédemment comment les comparaisons de caractéristiques entre les stratigraphies étaient réalisées, principalement à travers la base de données Neo4j en utilisant des requêtes Cipher. La comparaison lexicographique est basée sur une ontologie qui a été spécifiquement développée à cet effet durant le projet. Une première extraction des concepts de l'ontologie s'est faite automatiquement, notamment en recherchant les fréquences et les cooccurrences des termes utilisés dans les fiches d'artefacts ainsi que dans le lexique. Cette première étape nous a permis d'identifier 428 termes à potentiellement prendre en compte. Afin de simplifier la mise en place de l'ontologie, une première extraction des termes de la base de données a été réalisée. Cette dernière a produit 20 classes et 198 individus qui ont constitués le squelette de l'ontologie. Nous avons

ensuite spécifié les relations entre les classes (inclusions, disjonctions et restrictions de propriétés) avant d'insérer une partie des termes provenant de la première extraction. La dernière étape de la construction de l'ontologie a consisté à définir les assertions de propriétés afin de permettre au moteur d'inférence d'en déduire les assertions inverses (Figure 5).

Annotations: 'Both Formigli (pustules) and type I (Robbiola) otherwise'	Annotations: 'Multiform (warty - uniform) - pitting'
Annotations + 'artefacts_corrosiontype type' Both Formigli (pustules) and type I (Robbiola) otherwise	Annotations + 'artefacts_corrosionform form' Multiform (warty - uniform) - pitting
'artefacts_corrosiontype id' [type: integer] 9	'artefacts_corrosionform id' [type: integer] 8
label Both Formigli (pustules) and type I (Robbiola) otherwise	label Multiform (warty - uniform) - pitting
Property assertions: 'Both Formigli (pustules) and type I (Robbiola) otherwise'	Property assertions: 'Multiform (warty - uniform) - pitting'
Object property assertions + correspondsToCorrosionForm 'Multiform (warty - uniform) - pitting'	Object property assertions + isFoundInCorrosionType 'Both Formigli (pustules) and type I (Robbiola) otherwise'

Figure 5: Assertion de propriété d'objet et assertion inverse dans Protégé

L'ontologie à la fin du projet comprend les caractéristiques suivantes (Tableau 4):

Tableau 4: Caractéristiques de l'ontologie

Classes	12
Individus	186
Propriétés d'objet	5
Assertions de propriétés d'objet	373

Finalement, l'ontologie a été évaluée par rapport à un échantillon d'articles étudiant des objets patrimoniaux métalliques ne figurant pas dans la base de données MiCorr et dont l'analyse n'a pas été faite par des chercheurs affiliés à la HE-Arc. L'évaluation s'est faite en extrayant l'ensemble des termes des différents articles et en les comparant avec l'ontologie. Bien que l'échantillon soit petit, nous constatons qu'il y a un bon recouvrement entre le domaine de l'ontologie et celui d'un échantillon d'articles (Tableau 5). Ceci confirme, que bien que générée à partir de matériel produit en intégralité par des chercheurs de la HE-Arc, l'ontologie est assez générique pour pouvoir capturer la connaissance générée par des chercheurs externes à l'organisation.

Tableau 5: Evaluation de l'ontologie

Nombre de mots distincts dans l'ontologie	275
Nombre de mots distincts de l'ontologie retrouvés dans un/des article(s)	148
Nombre d'articles	13
Nombre d'apparition des mots de l'ontologie dans les articles	582

L'ensemble des résultats scientifiques présentés dans ce chapitre ont fait l'objet de publications académiques qui sont répertoriées dans la partie consacrée aux livrables scientifiques (Section 1.3).

OBJECTIFS TECHNIQUES

La mise au point de ce prototype, permettant de proposer, à partir d'une base de connaissances, des modèles de corrosion pressentis sur un objet en cours d'étude, passe par l'utilisation d'algorithmes basés sur des méthodes telles que les moteurs d'inférences, les systèmes experts, le datamining. Du fait de la possibilité d'enrichissement de la base de connaissances, il répond non seulement aux besoins de consultation de connaissances déjà acquises mais à l'affinement du travail de comparaison entre modèles pressentis et existants. Des forums de discussion optimiseront encore la qualité des données accessibles pour un diagnostic encore mieux argumenté.

RÉSULTATS

Le résultat du projet est une plate-forme fonctionnelle (hébergée à l'adresse <http://micorr.org>) qui regroupe un certain nombre de fiches d'objets issus des collections patrimoniales suisses et présentant des faciès de corrosion caractéristiques. Ces fiches ont été établies dans le cadre du projet MIFAC-Metal mené par la HE-Arc CR (Degrigny & Senn, 2012). La plate-forme comprend également un moteur de recherche textuel permettant de rechercher des artefacts en se basant sur une ontologie et un outil de construction et de comparaison de stratigraphies nouvellement constituées (Figure 6).

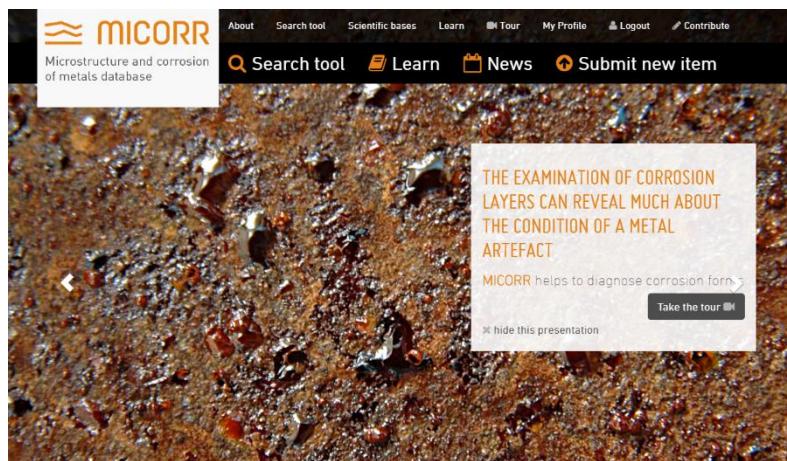


Figure 6: Capture d'écran du site micorr.org (avril 2016)

Afin de permettre une recherche avancée mettant en œuvre l'ontologie développée pour MiCorr, cette dernière a été intégrée dans un triplestore Apache Jena, qui permet de stocker, mais surtout d'accéder à l'ontologie stockée au format RDF. De ce fait, nous pouvons bénéficier de toute la puissance du triplestore via des requêtes SPARQL ainsi que de l'intégration des moteurs d'inférence directement dans Jena. Le lien avec le middleware est réalisé par RDFLib qui permet de faire la passerelle avec le triplestore via le SPARQL end-point de Jena, Fuseki (Figure 7).

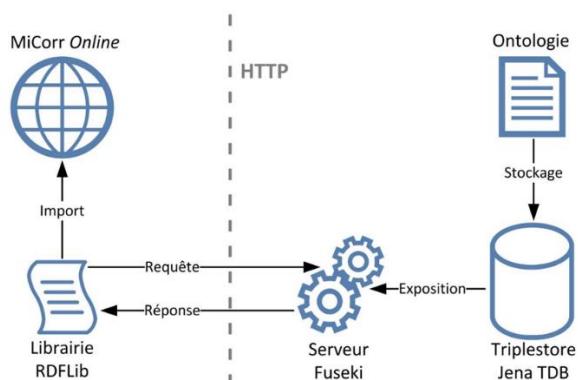


Figure 7: Schéma de l'architecture d'intégration de l'ontologie

d'autres en trop peuvent être supprimées. Une fois constituée la stratigraphie peut être comparée aux stratigraphies des artefacts des fiches MIFAC-Métal de la base de connaissances qui ont été construites selon la même méthode. Les résultats de la comparaison permettent au praticien de consulter des fiches d'artefacts présentant des faciès de corrosion proches de l'objet étudié. Ainsi sans prélèvement, il a une idée des altérations se développant à la surface et au cœur du matériau lui-même. Ces résultats peuvent

Les artefacts ainsi que toutes les données du site sont stockés dans une base de données relationnelle (PostgreSQL 9.4) alors que les stratigraphies des artefacts sont stockées dans une base de données en graphe (Neo4j 2.1.8). Le middleware est développé en Python 2.7 et utilise le framework Django 1.9 pour la gestion du backend et des requêtes HTTP. Finalement, l'interface utilisateur est développée avec AngularJS 1.3.15.

orienter ses choix d'intervention. Si aucune correspondance n'est possible, le praticien peut créer une nouvelle fiche (outil « *Submit a file* ») qui sera soumise à l'administrateur du site pour validation.

Finalement, dans un souci de recherche et d'amélioration continue de la plate-forme, toutes les interactions avec les utilisateurs sont enregistrées pour analyse ultérieure. Il sera possible, d'ici quelques mois, de faire des analyses sur la qualité des stratigraphies produites à l'aide de l'outil, que ce soit au niveau de la justesse des stratigraphies produites, ou du processus de création de ces stratigraphies. Comme la méthode est diffusée depuis Neuchâtel, ceci permettra d'évaluer l'impact de cette dernière sur le travail des conservateurs-restaurateurs ainsi que sa diffusion. Ces données permettront d'ouvrir de nouveaux champs de recherche ou de créer de nouvelles collaborations.

1.3. Description des livrables

LIVRABLES SCIENTIFIQUES

Le projet a permis la publication de trois articles, un working paper et quatre thèses de bachelor.

Degrigny C., Gaspoz C., Rosselet A., Boissonnas V., Jeanneret R. and Bertholon R. *Developing a Decision Support System for locally diagnosis of heritage metals*, In: METAL2016, proceedings of the ICOM-CC Metal WG conference, New Delhi, India, September, 2016.

De Santo A., Vonlanthen Y., Rosselet A., Degrigny C., Gaspoz C. *An ontology to support non-invasive diagnosis of heritage metals*, Haute école de gestion Arc, HES-SO, Neuchâtel, 2016.

Grosjean M. *MiCorr – Représentation de stratigraphies*. Bachelor Thesis, Haute école de gestion Arc, HES-SO, Neuchâtel, 2015.

Hubmann T. *Génération de modèles à partir de données en graphe*. Bachelor Thesis, Haute école de gestion Arc, HES-SO, Neuchâtel, 2016.

Rochat V. *Définition d'un outil informatique permettant de construire et comparer des faciès de corrosion*. Bachelor Thesis, Haute école de gestion Arc, HES-SO, Neuchâtel, 2015.

Rosselet A., Grosjean M., Degrigny C., Gaspoz C. *Computer-aided support system for metal diagnosis of patrimonial objects*, In: Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 444, pp 961-971, Springer International Publishing, March 2016.

Rosselet A., Rochat V., Gaspoz C. *Design of a new data structure to support non-invasive diagnostic on heritage metals*, In: Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Information Systems (MCIS), Samos, Greece, 3-5 October, 2015.

Vonlanthen Y. *Structuration de l'information à l'aide d'ontologies*. Bachelor Thesis, Haute école de gestion Arc, HES-SO, Neuchâtel, 2015.

LIVRABLES TECHNIQUES

Les livrables techniques sont tous intégrés dans la plate-forme MiCorr disponible à l'adresse micorr.org. La plate-forme actuelle comprend les espaces principaux suivants : *search tools*, *learn*, *contribute*. Le cœur de MiCorr est l'interface de consultation des faciès de corrosion présents dans la base de connaissances et de création de nouvelles stratigraphies pouvant devenir elles-mêmes des modèles de corrosion enrichissant la base de connaissances. Une première option de la consultation de données est la recherche par concepts, tels que définis dans l'ontologie et par mots-clés (Figure 8). Cette recherche permet aux conservateurs-restaurateurs de rechercher des artefacts de la base de connaissances en fonction d'un certain nombre de caractéristiques clefs (provenance, environnement, forme de corrosion). Elle permet également d'affiner les résultats issus de la recherche par comparaison de stratigraphies. Chaque artefact est représenté par une fiche détaillée (Figure 11) issue du projet MIFAC-Métal et qui pourra être complétée par de nouvelles contributions des utilisateurs via l'administrateur du site.

Le second type de recherche, et le résultat le plus innovant de ce projet, est la recherche de faciès de corrosion, qui s'adresse aux corrosionnistes et aux conservateurs-restaurateurs qui n'ont qu'une perception visuelle des formes de corrosion développées à la surface des matériaux qu'ils étudient. Cette application permet de construire une stratigraphie, strate par strate, en définissant l'ensemble des caractéristiques connues de chaque strate (Figure 9). En permettant à l'utilisateur de construire sa stratigraphie en temps réel, on se rapproche de la méthode employée par les praticiens lorsqu'ils réalisent leur dessin manuellement. Par ce biais, nous devrions avoir plus de facilité à obtenir l'adhésion de ces praticiens, qui verront en MiCorr un outil qui accompagne leur pensée plutôt qu'il la révolutionne.

by keywords

Keywords: Start searching here

Country: All France Switzerland

Metal Family: All Al Cu Fe Zn

Corrosion Forms: All Multiform - pitting Multiform - transgranular
Multiform (warty - uniform) - pitting Other Uniform - intergranular
Uniform - pitting Uniform - selective Uniform - transgranular

Environment: All Indoor atmosphere Lake Other
Outdoor atmosphere Outdoor to indoor atmosphere Soil Unknown

Figure 8: Interface de recherche par concepts et mots-clés

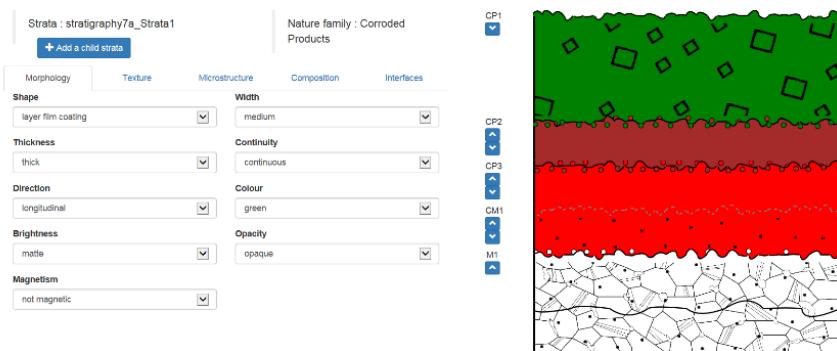


Figure 9: Construction d'une stratigraphie

Combinant une application de saisie des caractéristiques, un stockage dans la base de données en graphe et une visualisation vectorielle générée à partir du graphe, cette application permet aisément de rechercher des stratigraphies correspondant à l'objet d'étude. Le système retourne alors une liste d'artefacts dont le faciès de corrosion présente le plus de similarités avec la stratigraphie qui a été construite (Figure 10). L'utilisateur de la plate-forme a également la possibilité de sauvegarder chaque stratigraphie qu'il génère dans son profile utilisateur afin de pouvoir la consulter ultérieurement ou pour contribuer à MiCorr en publiant une nouvelle fiche de description d'un artefact. La seconde partie du site est destinée à l'apprentissage, tant de la méthode, que de l'outil. L'étude des faciès de corrosion avec la méthode des stratigraphies étant relativement nouvelle, un effort particulier a été mis en place pour présenter et expliquer la démarche (notamment à l'aide d'un tutoriel vidéo), décrire les concepts de base et la connaissances du domaine (à travers les *scientific bases*) ainsi qu'accompagner l'utilisateur durant son utilisation de l'outil à

List of similar artefacts

#	Matching 100%	Metal Family	Metal Alloy	Object	Technology	Chronology	Microstructure
1	84	Cu	Leaded Bronze	Jewellery	Late Bronze Age	As-cast	Dendritic structure with pores
2	76	Cu	Leaded Bronze	Jewellery	Late Bronze Age	As-cast	Dendritic structure
3	74	Cu	Leaded Bronze	Knife	Late Bronze Age	Cold worked after annealing	Polygonal and twinned grains + strain lines (metal surface) with pores
4	72	Cu	Leaded Bronze	Jewellery	Late Bronze Age	As-cast	Dendritic structure with pores
5	71	Cu	Tin Bronze	Pin	Late Bronze Age	Annealed after cold working	Polygonal and twinned grains

Figure 10: Résultat de la comparaison de faciès de corrosion

l'aide d'aide en ligne ou d'un glossaire décrivant l'ensemble des termes utilisés. Cette partie n'est pas encore totalement terminée au moment de l'écriture du rapport, elle le sera au terme de la clôture du dernier travail de bachelor encore en cours.

La dernière partie est l'ouverture de la plate-forme aux contributeurs externes. À travers MiCorr, les utilisateurs sont invités à partager et publier leurs résultats de l'étude d'artefacts afin d'étendre la base de connaissance et de la rendre plus pertinente au fil des ajouts. Grâce à MiCorr, les contributeurs peuvent créer de nouvelles fiches et stratigraphies, qui après validation par le comité scientifique, pourront être publiées sur la plate-forme. Ainsi plus qu'un outil, MiCorr va pouvoir se développer en centre de ressource et de partage d'information autour de la problématique de l'étude de la corrosion des matériaux métalliques. Le domaine conservation-restauration de la HE Arc est en train de mettre en place une stratégie pour l'animation et le suivi de la plate-forme. L'appel à contributions et la constitution du comité scientifique se fera à l'occasion de la conférence Metal 2016 (voir Section 1.6).

Figure 11: Exemple de fiche MiCorr

1.4. Valeur ajoutée, pertinence des résultats obtenus

Actuellement les professionnels de la conservation-restauration comme les corrosionnistes se basent sur leur expertise à la fois des matériaux et des faciès de corrosion développés sur ceux-ci ainsi que de leur utilisation dans des environnements particuliers pour établir des diagnostics qui sont souvent approximatifs. En présence de nouveaux faciès de corrosion, des prélèvements s'avèrent nécessaires pour des examens au cœur des matériaux. L'information collectée ne faisant pas toujours l'objet d'une publication, celle-ci n'alimente que l'expertise du professionnel concerné.

L'application MiCorr part de la même expertise mais vise au travers de la description précise des faciès de corrosion et de leur transcription simplifiée sous forme graphique à comparer ceux-ci le plus justement possible à des modèles de corrosion existants. Le diagnostic est donc plus juste car argumenté scientifiquement. Des prélèvements devront toujours être prélevés dans le cas d'un nouveau faciès de corrosion mais la construction de la stratigraphie correspondante permettra d'établir un nouveau modèle de corrosion. Aussi, à terme, la base de données s'enrichira et l'ensemble des professionnels bénéficieront des nouvelles connaissances acquises, ce qui les conduira à toujours prélever moins de matériaux.

Finalement, et malgré un nombre restreint d'artefacts dans la base de données, les premiers résultats de l'outil de comparaison sont encourageants. Le niveau de correspondance entre les stratigraphies analysées et retournées est bon et permet déjà de réduire de manière importante le temps passé à la recherche d'artefacts semblables lors de l'étude de faciès de corrosion. Avec l'augmentation des contributions, le niveau de pertinence s'améliorera, rendant l'outil encore plus performant pour les utilisateurs.

1.5. Degré d'innovation par rapport à l'état de l'art

Un tel outil de diagnostic n'existe pas actuellement : il combine deux outils de recherche, l'un par mots clefs et l'autre basé sur la construction de stratigraphies de corrosion, le second étant le plus innovant.

Il s'agit à la fois d'un outil de consultation via la comparaison entre les faciès de corrosion observés sur un objet inconnu et ceux d'une base de données mais également d'un outil de recherche permettant de construire de nouveaux modèles de corrosion qui à terme rendront l'outil plus performant.

Il s'adresse à plusieurs communautés: celle des chercheurs corrosionnistes et en conservation-restauration devant alimenter la base de données de nouveaux modèles de corrosion mais également celle des conservateurs-restaurateurs qui non seulement consulteront la base mais contribueront également à son enrichissement par les nouvelles stratigraphies créées et partagées.

1.6. Lien du projet avec la stratégie du domaine de recherche

DIMENSION INTERNATIONALE

Toutes les publications issues du projet ont été présentées dans des conférences ou des publications à audience internationale.

La corrosion des métaux est un domaine éminemment international. Des matériaux différents peuvent avoir été exposés à des environnements variés tout en présentant des faciès de corrosion assez proches. L'outil en ligne MiCorr devrait permettre via son réseau d'experts et de contributeurs l'échange d'information entre partenaires de différents pays et la construction d'un savoir commun au niveau international.

IMPACT RÉGIONAL DE LA RA&D

La base de données de l'application MiCorr a été établie à partir d'une sélection d'objets patrimoniaux issus des collections suisses, et en particulier des collections des cantons de Neuchâtel, du Jura, de Vaud et de Genève. L'intérêt des professionnels de la conservation-restauration pour un tel outil est très fort car il permet de rassembler un savoir commun qui autrement serait dispersé, de l'enrichir de données nouvelles et de comparer celles-ci à une base de connaissance plus large qui dépasse les frontières de la Suisse.

Etant encore dans une phase exploratoire, il n'y a pas encore eu de transfert de compétences vers les entreprises de la région. La mise sur pied d'un projet de suite va nous permettre d'atteindre cet objectif.

DIVERSIFICATION DES SOURCES DE FINANCEMENT DE RECHERCHE

Le projet a bénéficié à la fois des fonds ISnet mais également des fonds destiné aux impulsions en matière de recherche et développement économique régional. Il va être utilisé comme levier pour déposer un projet de suite permettant d'augmenter la maturité des outils développés dans le cadre du projet.

VALORISATION DES RÉSULTATS DE LA RA&D

L'application MiCorr sera présentée lors de la conférence internationale METAL2016 du groupe Métal d'ICOM-CC qui se tiendra en septembre 2016 à New Delhi. C'est la plus importante conférence internationale des professionnels de la conservation-restauration spécialité Métal. A cette occasion nous organiserons un atelier de démonstration de l'outil MiCorr. Cette conférence sera donc la plateforme idéale de la diffusion du savoir sur cet outil et nous espérons motiver nos partenaires étrangers à devenir des contributeurs proactifs de l'application MiCorr.

RELÈVE SCIENTIFIQUE DANS LES ÉCOLES

Le projet a permis la formation d'un assistant à la recherche et à la rédaction d'articles. Antoine Rosselet a été co-auteur de toutes les publications du projet.

2. VOLET ÉCONOMIQUE

2.1. Valorisation des résultats

Il était prévu dans le cadre du projet de déposer un projet CTI afin de poursuivre le développement de l'application MiCorr initiée pour l'instant dans le secteur patrimonial et de faire évoluer sa base de connaissances dans le secteur de la corrosion industrielle. Nous avons approché la Société Suisse de Protection contre la Corrosion (SGK) pour le montage du projet et nous pensons les sensibiliser à pertinence de l'outil développé au terme du projet afin d'imaginer effectivement une application de la méthodologie mise au point dans le domaine du diagnostic de la corrosion industrielle.

2.2. Valeur ajoutée, pertinence des résultats obtenus

Une application de l'outil MiCorr dans le secteur industriel serait une valeur ajoutée pour ce secteur mais également pour celui de la conservation-restauration car cela permettrait de mieux diagnostiquer les objets patrimoniaux techniques et scientifiques qui sont toujours en fonctionnement et qui subissent des altérations rencontrées habituellement dans le domaine industriel. De la même façon le secteur industriel devrait bénéficier des observations effectuées sur les matériaux patrimoniaux afin de prévoir des altérations sur le long terme et leurs conséquences sur ces objets.

2.3. Communication des résultats

La communication des résultats aux partenaires économiques se fera en collaboration avec la SGK auprès de ses membres. Il est également envisagé de proposer des formations continues destinées aux professionnels pour les introduire à la méthode et à l'outil.

3. VOLET PÉDAGOGIQUE

3.1. Valorisation pour l'enseignement

L'application MiCorr sera intégrée dans la formation des étudiants Master en conservation-restauration qui sont sensibilisés à la méthodologie descriptive des strates de corrosion de Bertholon. Ce transfert de savoir se limite actuellement à la construction manuelle de stratigraphies de corrosion qui ne sont conservées que dans des rapports internes et non diffusés. Avec l'application MiCorr ces mêmes étudiants bénéficieront d'un outil de diagnostic leur permettant de comparer leur stratigraphie transcrise sur de manière graphique à des modèles de corrosion existants. Ils pourront également enrichir la base de données avec leurs projets en cours via la construction de nouveaux modèles de corrosion et diffuser plus largement l'information acquise aux communautés impliquées dans le développement de MiCorr. Cet exercice leur fera percevoir le caractère international du savoir dans le domaine concerné.

3.2. Partenariat avec d'autres hautes écoles

L'outil MiCorr devrait pouvoir bénéficier de contributions de chercheurs corrosionnistes et / ou de chercheurs en conservation qui enseignent souvent dans d'autres écoles de conservation-restauration étrangères. Le réseau MiCorr intègrera ces nouveaux partenaires, dont une partie sont déjà en contact avec la HE-Arc au travers du Swiss Conservation-Restoration Campus.

3.3. Collaboration à la mise sur pied de cours postgrades

Pour l'instant, ce projet n'a pas présenté d'opportunités de collaboration ou de mise sur pieds de cours postgrades.

4. ANNEXES

COLLABORATEURS

Nous tenons à remercier toutes les personnes ayant collaboré à ce projet, pour leur partage de connaissances et leurs contributions.

HE-Arc

Régis Bertholon, Valentin Boissonnas, Fabrice Chapuis, Alessio De Santo, Christian Degrigny, Boris Fritscher, Cédric Gaspoz, Marcel Grosjean, Thierry Hubmann, Romain Jeanneret, Vincent Rochat, Antoine Rosselet, Yann Vonlanthen, ainsi que les étudiant-e-s du master en conservation-restauration.

HES-SO//Valais-Wallis

Fabian Cretton, Dominique Genoud, Maria Sokhn.

BIBLIOGRAPHIE

- Bertholon, R. (2000, December 20). *La limite de la surface d'origine des objets métalliques archéologiques. Caractérisation, localisation et approche des mécanismes de conservation*. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.
- Bertholon, R. (2001). Characterisation and Location of Original Surface of Corroded Metallic Archaeological Objects. *Surface Engineering*, 17(3), 241–245.
- Degrigny, C., & Senn, M. (2012). *MIFAC-Métal: Methodology to Study and Analyse the Microstructures and Corrosion Forms of Ancient and Historic Metals: Application to Metallographic Samples from Swiss Collections*. Neuchâtel.

Pour le RCSO ISNet

Le coordinateur : Laurent Sciboz

Le chef de projet

Cédric Gaspoz

