

## **Objectifs et démarche**

Les cloches, de par leur musicalité, les ornements historiques, artistiques et symboliques qu'elles portent, sont des objets patrimoniaux par excellence. La Société Française de Campanologie (SFC) en dénombre plus de 450 000 toujours actives sur le territoire national. Soumises à différentes altérations atmosphériques, elles constituent à ce titre autant d'indicateurs de pollution. Elles sont dans un contexte industriel ancestral et novateur attentif aux évolutions technologiques. En atteste le remplacement de 8 cloches de Notre Dame de Paris en 2013 qui a nécessité la coulée de 23 tonnes de bronze pour 2 millions d'euros de chiffre d'affaire. Aucune étude approfondie sur les mécanismes de dégradation du bronze campanaire n'a été encore entreprise. Il est donc indispensable, pour la défense de ce patrimoine matériel et immatériel, de cerner les mécanismes qui concourent à son altération.

Cette thèse s'insère dans le cadre d'un projet ANR Jeune Chercheur 2018. Elle a pour objectif **d'établir les processus physicochimiques et mécaniques responsables de la corrosion micro-infiltrante du bronze campanaire biphasé  $\alpha/\delta$  utilisé pour la fabrication des cloches et d'évaluer ses conséquences sur la qualité sonore de l'instrument**. En effet, cet alliage Cu-Sn (22%wt Sn), est soumis à une altération très complexe : à la fois physicochimique liée à un environnement de plus en plus agressif mais aussi mécanique de part la diversité de son usage instrumental. Aucune étude n'a permis d'investiguer la dynamique d'infiltration des agents corrosifs qui résulte de l'interaction des contraintes mécaniques avec l'altération binaire alliage / environnement, de même que son impact sur la longévité et la qualité sonore des cloches. Pour ce faire, il est indispensable d'étudier l'altération micro - infiltrante à différents stades en laboratoire. Pour mener à bien ce projet, cette thèse se déroulera selon **4 axes directeurs**.

**(1) Etablir les propriétés physicochimiques et sonores d'une cloche, connaître les paramètres environnementaux et la genèse des microfissures** conjointement responsables de l'altération des cloches, sont des données indispensables à fixer pour organiser un corpus pertinent d'échantillons.

**(2) L'altération mécanique et physicochimique reproduite en laboratoire comparée à la patine naturelle développée sur les échantillons anciens** permettra de fournir des éprouvettes corrodées à différents stades pour étudier les réseaux micro-infiltrants d'altération. Nous nous concentrerons sur deux environnements d'altération: l'atmosphère urbaine et marine. Pour mieux comprendre la protection de la couche de corrosion (patine) et la corrosion préférentielle des phases  $\alpha/\delta$  en tenant compte des impuretés de l'alliage, une altération **par voie électrochimique** sera réalisée.

**(3) L'effet micro / nano infiltrant de l'altération sur la modification des propriétés mécaniques de l'alliage biphasé  $\alpha/\delta$  et l'impact de la fatigue du matériau sur les chemins de corrosion** seront quantifiés à partir des échantillons altérés en laboratoire et des échantillons anciens. Le **seuil d'altération générant une perturbation sonore audible** sera corrélé à l'état de corrosion micro-infiltrante.

**(4) Un processus d'altération physicochimique et sonore des bronzes campanaires** sera proposé.

Le consortium pluridisciplinaire pour mener à bien ce projet rassemble des laboratoires ayant chacun sa spécificité. Le LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques) maîtrise une méthodologie de traçage isotopique et cartographie nano-SIMS permettant d'étudier l'altération des matériaux du patrimoine. La circulation de l'eau (D/H), les sources de contamination et les zones de précipitation ( $^{18}\text{O}$ ) de phases dans les matériaux permettent de mieux comprendre les processus d'altération. Cette méthode devra être adaptée au bronze campanaire. La réalité des conditions environnementales auxquelles sont soumises les cloches sera respectée grâce aux plateformes météorologiques du LISA et du CICRP (Centre Interdisciplinaire de la Conservation et de la Restauration du Patrimoine-Marseille) qui mesurent finement les caractéristiques physicochimiques et météorologiques des milieux urbains (Créteil) et marin (Marseille). Ces données seront reproduites en laboratoire dans des chambres d'altération (CIME/CIME2-LISA) qui accéléreront les processus de corrosion tout en respectant la réalité de l'environnement d'exposition. Le LaMcube (Laboratoire de Mécanique, Multi-Physique et Multi-échelle-Lille) dispose de différentes machines de fatigue et de moyens de caractérisation des microstructures des matériaux métalliques et de leur endommagement. L'ICMPE (Institut de Chimie des Matériaux de Paris-Est Créteil) dispose d'une plateforme d'élaboration métallurgique et d'un plateau technique de microscopie. Pour comprendre comment la signature sonore des cloches peut être affectée par la corrosion, le LAUM (Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine) dispose d'outils d'analyse modale (méthode haute résolution notamment) permettant d'identifier les modes vibratoires et de les corrélés aux signaux ultrasonores générés par émission acoustique.

### **Résultats attendus**

A terme, cette thèse contribuera à établir (1) la prédiction des zones préférentielles susceptibles d'accueillir les chemins infiltrants de corrosion et ce en fonction des propriétés physicochimiques et mécaniques de la couche de corrosion superficielle et de l'alliage sous-jacent, (2) l'impact de la structure biphasée sur le processus de corrosion (3) le seuil de corrosion impactant significativement la qualité sonore des cloches (4) les processus physicochimiques et mécaniques d'altération des cloches corrélés à l'évolution de leur qualité sonore.

Pour la première fois, en corrélant l'impact de l'altération physicochimique infiltrante du bronze campanaire aux qualités sonores des cloches, les résultats de cette thèse contribueront à l'avènement de technologies de conservation et de restauration innovantes respectueuses de l'œuvre d'art et de sa fonctionnalité instrumentale.

### **Laboratoires du consortium**

**LAUM** - Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine - Le Mans

**LaMcube** - Laboratoire de Mécanique, Multi-Physique et Multi-échelle - Lille

**CICRP** - Centre Interdisciplinaire de la Conservation et de la Restauration du Patrimoine-Marseille

**ICMPE** - Institut de Chimie des Matériaux de Paris-Est Créteil

### **Laboratoire d'accueil**

**LISA – Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques**

UMR CNRS 7583, Université Paris-Est Créteil,

61, avenue du Général de Gaulle,

94010 Créteil cedex France

## **Profil du candidat et compétences recherchées**

Le (ou la) candidat(e) recherché(e) doit avoir de bonnes bases en structure et propriétés des métaux (notamment microstructure, corrosion et propriétés mécaniques). Il (ou elle) doit avoir une bonne connaissance des techniques de caractérisation des matériaux à micro et nano-échelle (microscopie électronique, DRX, Raman, XPS, micro-dureté...). Des aptitudes en électrochimie (cellule électrochimique, courbes de polarisation, potentiel de corrosion, voltampérométrie, couplage galvanique...) seront les bienvenues. Un attrait pour l'acoustique musicale et des notions sur le contrôle non destructif ultrasonore des matériaux seront appréciés.

## **Niveau académique**

Bac+5 (ingénieur ou master 2)

**Mots clefs** bronze alliage Cu-Sn, Corrosion atmosphérique, contraintes mécaniques, électrochimie, acoustique musicale, modes de vibrations

**Financement** ANR JC 2018 – BellACorr – « Corrosion atmosphérique et altération mécanique des bronzes campanaires : un patrimoine sonore et artistique en danger ? »

**Démarrage du financement** 1<sup>er</sup> janvier 2019

**Rémunération brute** 1800 euros / mois (durée 3 ans)

**Ecole doctorale** Sciences, ingénierie et environnement - (SIE) ED 531

**Contacts** Envoyer CV, relevés de notes (M1-M2 ou équivalents) et lettre de motivation à [aline.petitmangin@lisa.u-pec.fr](mailto:aline.petitmangin@lisa.u-pec.fr) **au plus tard le lundi 22 octobre 2018**. Une audition est prévue pour les candidatures retenues.