

**Proposition de stage de Master 2 « Science des Matériaux »  
CIRIMAT (équipe OVM) /société CAELIS**

Caractérisation multi-échelle et analyse de défaillance de transducteurs piézoélectriques d'humidification : définition d'un cahier des charges pour une solution sans plomb

**Contexte**

L'humidification ultrasonore repose sur un transducteur piézoélectrique excité à sa fréquence de résonance. La vibration transmise à l'eau génère une colonne d'eau et un brouillard fin. La performance globale dépend du matériau piézoélectrique, mais aussi du couplage mécanique, du niveau d'eau, de la température, de la tension, de l'électronique d'excitation et de l'état de surface.

Ce stage de M2 est proposé par la société CAELIS, et se déroulera majoritairement au CIRIMAT, Université de Toulouse. La société CAELIS est un fabricant français d'enceintes pharmaceutiques et expert en maintenance climatique multimarque, localisée à Gratentour, au nord de Toulouse. CAELIS souhaite réduire sa dépendance aux transducteurs piézoélectriques fabriqués en Asie et développer une technologie propriétaire, sans plomb, adaptée à l'humidification ultrasonore.

Le PZT (zirconate-titanate de plomb) est très performant pour les applications piézoélectriques, mais son principal inconvénient est sa forte teneur en plomb, un élément toxique et préoccupant pour l'environnement et la santé.

Les principales raisons de rechercher des alternatives sont reliés à différents enjeux :

- Enjeux environnementaux et sanitaires : le plomb est une substance toxique, notamment lors de la fabrication, du recyclage ou de la fin de vie des dispositifs.
- Réglementation : les réglementations européennes, notamment la directive RoHS, cherchent à limiter l'utilisation de substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques.
- Développement de matériaux plus durables : l'objectif est de disposer de matériaux sans plomb tout en conservant des propriétés piézoélectriques élevées.
- Enjeu scientifique : remplacer le PZT est difficile car il possède une combinaison particulièrement favorable de propriétés piézoélectriques, diélectriques, mécaniques et de stabilité.

**Objectif**

L'objectif de ce stage est de contribuer au développement de matériaux piézoélectriques sans plomb de nouvelle génération, afin de proposer une alternative au PZT. L'étude portera notamment sur l'élaboration, la caractérisation structurale et fonctionnelle des matériaux afin d'évaluer leurs performances et leur potentiel de substitution.

Le projet de stage M2 proposé ne se limitera pas au remplacement chimique du plomb. Il doit traiter simultanément de la composition de la céramique, sa microstructure, les électrodes et interfaces, la géométrie, l'assemblage mécanique, le pilotage électrique, la résistance à la cavitation et aux dépôts minéraux, ainsi que la reproductibilité industrielle.

**Consortium**

Ce projet regroupe 2 entités : la société CAELIS & l'Unité Mixte de Recherche CIRIMAT (Centre InterUniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux), Université de Toulouse.

**Lieux du stage**

Majoritairement au CIRIMAT

Plusieurs séjours de quelques jours dans la société CAELIS

Séjour de 2 semaines à Maubeuge pour réaliser des mesures piézoélectriques

|                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Description détaillée du stage. Le projet de Master 2 sera organisé en 5 workpackages</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|

**WP1. Bibliographie (1 mois) (M1)**

L'analyse bibliographique conduit à séparer le projet en trois niveaux techniques et deux domaines de compétences : (1) Le matériau piézoélectrique, relevant principalement du génie des matériaux ; (2) Le transducteur, son assemblage, son comportement vibratoire et son électronique de puissance, relevant d'un couplage matériaux-acoustique-électronique embarquée ; (3) L'intégration dans l'humidificateur, qui relève principalement de l'ingénierie CAELIS, tout en fournissant les conditions aux limites et les critères de validation de la recherche

*Livrable : rapport sur l'état de l'art et matrice des propriétés*

**WP2. Campagne comparative des piézoélectriques neufs et défaillants (5 mois) (M1-M3)**

Analyses structurales (Diffraction des rayons X, Fluorescence X), microstructurales (Microscopie électronique à balayage, EDX) et électriques, des composants industriels

*Livrable : base de données des caractérisations*

**WP3. Analyse des causes de défaillance et essais discriminants (2 semaines) (M2-M4)**

Etablir des relations structure/microstructure/propriétés

*Livrable : proposer des hypothèses de mécanismes de défaillance*

*Coll. Mohamed Rguiti, laboratoire CERAMATHS, Maubeuge*

**WP4. Participer à la mise en place d'un banc fonctionnel instrumenté (2 semaines) (M2-M5)**

Préciser et établir le cahier des charges, les gammes de température, de débit, de vieillissement

*Livrable : protocole précis*

*Prendre connaissance des technologies de la société*

*Le banc sera réalisé par la société*

**WP5. Choix d'un système pour remplacer PZT : KNN, BNT-BT, BaTiO<sub>3</sub> dopé (M1-M5)**

Premières synthèses et élaboration,

*Livrable : essais exploratoires : synthèse et frittage*

|                                  |
|----------------------------------|
| <b>Candidature et conditions</b> |
|----------------------------------|

**Compétences visées** : formation en science des matériaux, une forte motivation, rigueur scientifique et curiosité, goût pour l'expérimentation, autonomie, organisation et esprit critique, sens des contraintes industrielles, capacité à travailler en équipe, être capable de faire le lien entre recherche fondamentale et application industrielle.

Durée : 6 mois, Indemnité : 650 €/mois (+ prise en charge des frais de déplacement)

**NB. A l'issue du stage de M2 une thèse CIFRE avec l'entreprise CAELIS est envisagée.**

**Candidature et lettre de motivation à envoyer aux 3 contacts :**

Société CAELIS : Fares Ben Othman : [fbenothman@caelis-solutions.com](mailto:fbenothman@caelis-solutions.com)

CIRIMAT : Sophie Guillemet-Fritsch : [sophie.guillemet-fritsch@utoulouse.fr](mailto:sophie.guillemet-fritsch@utoulouse.fr)

CIRIMAT : Lionel Presmanes : [lionel.presmanes@utoulouse.fr](mailto:lionel.presmanes@utoulouse.fr)

**Date limite de candidature** : 30 novembre 2026