

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Caractérisation et modélisation de composite oxyde/oxyde sous chargements thermomécaniques complexes**

Référence : **MAS-DMAS-2025-05**  
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : **Octobre 2025**

Date limite de candidature : **Avril 2025**

**Mots clés : Composites à Matrice Céramique, Oxyde/Oxyde, Comportement thermomécanique, gradients thermiques, concentration de contraintes**

### Profil et compétences recherchées

Profil universitaire ou Ecole d'ingénieurs, spécialisation mécanique ou matériaux

Compétences en modélisation thermomécanique

Intérêt pour les travaux expérimentaux et numériques

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

La réduction de l'impact environnemental est l'enjeu majeur du secteur aéronautique pour l'avenir. Cet objectif se traduit par des évolutions dans le développement des appareils comme un allègement des structures ou un gain en performance des moteurs. L'augmentation des températures de fonctionnement des systèmes de propulsion est un des principaux axes de travail et le développement de matériaux répondant à cette contrainte est donc critique. C'est pour cela que des solutions alternatives aux matériaux métalliques aujourd'hui employés telles que les matériaux composites à matrice céramiques (CMC) sont étudiées. En effet, ces matériaux possèdent une densité inférieure aux alliages actuels tout en conservant leurs propriétés mécaniques jusqu'à haute température. Parmi les différentes natures de CMC développées, les composites oxyde/oxyde sont notamment envisagés pour des applications thermostructurales jusqu'à des températures de 800 °C telles que les arrières corps de moteurs aéronautiques.

Dans ce contexte, l'ONERA collabore avec l'IRT Saint Exupéry et avec les principaux industriels français de la filière oxyde/oxyde dans le cadre du projet OXYGEN2 sur la mise en place d'une méthodologie commune de caractérisation et de modélisation du comportement thermomécanique de ces matériaux. L'utilisation du plein potentiel de ces matériaux nécessite la définition de chargements thermiques et mécaniques admissibles par le matériau sur toute sa durée de vie. La maîtrise de l'impact de gradients thermiques et mécaniques est aussi critique.

Cette thèse a pour ambition de mettre en place une méthodologie d'essais permettant d'identifier et valider un modèle thermomécanique avant de l'éprouver sur un cas de chargement représentatif d'une application aéronautique. Pour cela une démarche expérimentale progressive sera à conduire. Dans un premier temps le comportement du matériau en traction monotone à température uniforme sera étudié. L'objectif est ici de mieux cerner la durée de vie du matériau en dessinant un domaine temps/température/chargement en prenant en compte le comportement endommageable du matériau ainsi que le fluage observé à plus haute température. Dans un deuxième temps, il s'agira d'étudier le comportement en traction cyclée sous conditions isotherme puis anisotherme. L'analyse *post-mortem*, notamment par observations au microscope électronique à balayage (MEB) permettront de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu. En parallèle le comportement du matériau sous gradient thermique sera étudié. Ces essais seront réalisés sur des bancs spécifiques et uniques développés à l'ONERA utilisant des lasers comme source de chauffage. Un dialogue Essais/Calculs sera mis en place pour déterminer les essais pertinents pour identifier le modèle. Il sera alors nécessaire de porter une attention particulière à l'instrumentation des essais, basées sur des méthodes optiques ou acoustiques, afin de disposer des données nécessaires à l'identification. Enfin des essais de validation du modèle sur éprouvettes technologiques sous gradients thermiques seront à mettre en place en commençant par le dimensionnement des essais puis leur réalisation et leur analyse.

### Collaborations envisagées

IRT Saint-Exupéry, MBDA, SAFRAN, CEA, St Gobain, ...

**Laboratoire d'accueil à l'ONERA**

Département : Matériaux et Structures

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

**Contact** : Antoine Débarre

Tél. : 0146734637      Email : antoine.debarre@onera.fr

**Directeur de thèse**

Nom : Pascal Reynaud

Laboratoire : MATEIS (INSA-Lyon)

Tél. : 04 72 43 82 93

Email : pascal.reynaud@insa-lyon.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>

## **NOTA :**

La proposition de sujet de thèse est destinée à être publiée et doit être rédigée à destination des candidats. Eviter les acronymes et le jargon technique. Mettre en avant les compétences qui seront acquises au cours de la thèse.

La motivation de la proposition de sujet et les compléments à destination de la DSG sont à renseigner ci-dessous.

**Le sujet doit impérativement être validé par le département du proposant et diffusé à la DSG par l'intermédiaire de l'Adjoint Scientifique.**

### **PARTIE DESTINEE EXCLUSIVEMENT A LA DSG**

Les rubriques suivantes doivent être dûment renseignées :

#### **1. Domaine et thématique scientifique, défi et feuille de route adressés**

Domaine scientifique principal (MAS / MFE / PHY / SNA / TIS) : **MAS**

Thématique scientifique principale (liste [ici](#)) : Modélisation et caractérisation multi-échelle et multi-physique des matériaux

Défi du PSS (liste [ici](#)) : 6 - Matériaux aérospatiaux stratégiques

Feuille(s) de route (liste [ici](#)) : 2.1 - Motorisation plus efficace à émissions réduites

#### **2. Objet de la thèse**

Ce sujet fait suite à la thèse d'A. Débarre (DMAS/EPIC) sur l'étude du comportement mécanique d'un composite oxyde/oxyde en température. Lors de ces travaux, des gammes de température correspondant des comportements matériaux différents ont été déterminés. Une modélisation du comportement endommageable prenant en compte la température a aussi été proposée. Cette thèse a pour ambition d'aller plus loin dans la compréhension et la description du comportement du matériau entre 700 et 1000 °C ce qui représente la gamme de température envisagée pour une application aéronautique. L'objectif sera de mettre en place une méthode de caractérisation adaptée à l'identification du modèle de comportement déjà développé. D'un point de vue expérimental, il s'agira de se rapprocher des chargements réels par la réalisation de cyclages thermiques et mécaniques, mais aussi la présence de gradients thermiques et de concentrations de contraintes.

#### **3. Descriptif de la thèse**

a. Quels sont les problèmes qui se posent ?

- Comprendre l'effet de la température et du chargement sur la durée de vie du matériau
- Mise en place d'une méthodologie d'identification du comportement mécanique en température
- Proposer et valider une méthodologie pour prendre en compte les gradients thermiques et mécaniques

b. Quel est l'état de l'art ?

Le comportement des composites oxyde/oxyde à température ambiante est bien connu [1], [2]. Ceux-ci montrent une faible dépendance à la température sur une large gamme de température. Cependant, lorsque la température d'essai s'approche de la température d'élaboration des fibres, le fluage devient très rapidement prédominant. Pour utiliser le plein potentiel de ces matériaux, il est donc nécessaire de comprendre plus finement les mécanismes mis en jeu ainsi que de définir un domaine d'utilisation [3]. Une modélisation du comportement a déjà été proposée dans la direction des fibres [4]. Cependant le comportement sous gradient thermique et de contrainte de ces

matériaux est pour l'instant mal connu. A notre connaissance, seule la thèse de Marion Broutelle [5] étudie les effets de concentrations de contraintes sur ce type de matériaux.

c. Quels sont les objectifs généraux et les perspectives au-delà de la thèse proprement dite ?

Ces travaux ont pour vocation d'établir un modèle et une méthodologie d'identification du comportement mécanique en température pouvant être transféré en bureau d'étude pour permettre à terme un dimensionnement optimal de ces matériaux.

#### **4. Programme de la thèse**

a. Quelles sont les questions scientifiques traitées ?

Etude du comportement mécanique en température et sous gradients thermique et de contrainte

b. Quelles sont les approches scientifiques proposées : point de départ des travaux, démarches envisagées, moyens mis en œuvre ou expérimentations prévues ?

##### Point de départ :

Le comportement à température homogène de ce type de matériaux est connu. Un modèle d'endommagement a déjà été proposé (Thèse A ; Debarre).

Les moyens d'essais sont disponibles et opérationnels (en particulier le banc Simba)

##### Démarche envisagée :

Couplage fort entre Modélisation et expérimentation (Voir programme détaillé ci-dessous)

##### Moyens mis en œuvre :

Chaine de dialogue essai-calcul la mise en place d'une méthodologie d'identification du comportement mécanique

Moyens expérimentaux : machine de traction, bancs laser et instrumentation associée.

c. Programme prévu

##### I. Etude bibliographique (T0 à T0 + 6mois) :

Cette partie permettra au candidat de prendre en main les différents aspects essentiels à la compréhension du sujet. Il devra d'une part s'intéresser au comportement mécanique des CMCs et des particularités des composites oxyde/oxyde. D'un point de vue numérique, un bilan des modèles d'endommagement et de fluage sera à réaliser. Il s'agira également d'analyser les différences et similitudes entre les Oxydes/Oxydes et les Composites à Matrice Organique qui ont donné lieu à beaucoup de travaux (citons par exemple les techniques de Point Stress pour prendre en compte les concentrations de contraintes).

##### II. Comportement mécanique à température uniforme (T0 + 6 mois → T0 + 24 mois)

Dans cette première partie, des essais de traction monotone permettront au candidat de prendre en main le modèle et réaliser une première identification du comportement. De courts essais de fluage, ainsi que des essais cycliques permettront de compléter le modèle.

##### III. Comportement sous gradient thermiques et mécaniques (T0+12 mois → T0 + 30 mois)

Le candidat réalisera les essais sur le banc laser SIMBA avec lequel il étudiera, entre autres l'effet du gradient thermique sur le comportement du matériau. Il devra mettre en œuvre toute l'instrumentation nécessaire à l'analyse des essais. Une méthodologie spécifique devra être développée pour prévoir le comportement en présence de gradients thermiques et mécaniques. En fin de thèse, le comportement étant identifié, un essai de validation type essais de traction sous gradient thermique sur une éprouvette présentant des singularités géométriques sera à dimensionner et réaliser afin d'éprouver le modèle et la méthodologie de calcul.

##### IV. Rédaction du manuscrit (T0 + 30 mois → T0 + 36 mois)

#### d. Résultats attendus

Montée en compétence sur la caractérisation et la modélisation des composites oxyde/oxyde notamment sous chargement complexe.

Maintien du partenariat avec l'IRT St Exupéry et renforcement des collaborations avec les principaux partenaires industriels de la filière Oxyde/Oxyde (St Gobain, MBDA, Safran, Pyroméral,...)

### 5. Références

- [1] N. Guel, « Comportement mécanique de composites oxydes : relations procédé-microstructure-propriétés », Thèse de l'Université de Lyon, 2018.
- [2] C. Ben Ramdane, « Etude et modélisation du comportement mécanique de CMC oxyde/oxyde », Thèse de l'Université de Bordeaux, 2014.
- [3] A. Débarre, « Comportement mécanique à haute température d'un composite alumine/alumine », Thèse de Mines ParisTech, 2021.
- [4] A. Débarre, C. Przybyla, F. Laurin, T. Jackson, et J.-F. Maire, « Characterisation and damage modelling of oxide/oxide composites considering temperature dependence », *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2024, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.05.015.
- [5] M. Broutelle, F. Lachaud, L. Barrière, A. Daidié, A. Chardonneau, et F. Bouillon, « Bearing damage identification in oxide/oxide ceramic matrix composite with a new test design », *Compos. Struct.*, vol. 236, p. 111902, mars 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111902.

### 6. Compléments

- a. Personnes participant à l'encadrement en plus des (co)directeur(s) de thèse

Antoine Débarre (DMAS/EPIC) ; Thibaut Archer (DMAS/EPIC)

- b. Liens avec des projets de recherche et/ou avec d'autres thèses menées à l'ONERA

Continuité avec les travaux sur cette famille de matériaux. Interaction avec le projet OXYGEN2 en cours de montage et avec les projets déjà en cours (PHYDROMAT, MAFUSI6).

- c. Verrous scientifiques ou techniques, risques potentiels

#### Verrous :

- Compréhension du comportement mécanique sous gradient thermique
- Prise en compte des concentrations de contraintes
- Méthodologie d'identification du modèle sous sollicitations thermomécaniques complexes

#### Risques :

- Panne sur les moyens de caractérisation (risque faible : plusieurs moyens différents envisagés)
- Mise en œuvre de l'accord de collaboration avec les différents partenaires du projet OXYGEN2

- d. Objectif de valorisation des travaux

Participation à des conférences (au minimum une nationale et une internationale)

Publication d'au moins un article dans des revues à comité de lecture.

Interactions au sein du GDR (CMC)2 (participations possibles aux ateliers ou aux journées scientifiques du GdR).

### 7. Financement envisagé

Cocher dans la colonne de droite

Type de bourse	
----------------	--

ONERA	<input type="checkbox"/>
DGA	<input type="checkbox"/>
CNES	<input type="checkbox"/>
Région	<input type="checkbox"/>
CIFRE (préciser ci-dessous le financeur et éventuellement le candidat envisagé)	<input type="checkbox"/>
Contrat doctoral (préciser ci-dessous le % de financement extérieur attendu)	<input type="checkbox"/>
Autre (préciser ci-dessous le financeur et le % de financement extérieur attendu)	<input checked="" type="checkbox"/>

Précisions sur le financement : Co-financement IRT St Exupéry / ONERA

Candidat éventuel :