

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Modélisation et simulation numérique multiphysique de la chambre de combustion d'un propulseur hybride**

Référence : **MFE-DMPE-2026-15**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse** : 01/10/2026

**Date limite de candidature** : 01/05/2026

### Mots clés

propulsion hybride, simulation numérique, CEDRE, MoDeTheC, couplage écoulement-dégradation d'un combustible

### Profil et compétences recherchées

Ingénieur grandes écoles ou université master 2 avec mention (bien ou très bien)

Compétences : mécanique des fluides, thermique, CFD, développement de code (Fortran, C/C++, Python, etc...)

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

La propulsion hybride (Figure 1) associe un oxydant liquide avec un combustible solide. Généralement, l'oxydant est injecté dans une pré-chambre de combustion dans laquelle il se vaporise avant de pénétrer dans la chambre de combustion située à l'intérieur du combustible solide à l'instar des moteurs à propergol. L'oxydant gazeux réagit ensuite avec les gaz de combustion issus de la pyrolyse du combustible pour former une flamme de diffusion. Le phénomène est alors auto-entretenu puisque la réaction chimique exothermique permet la dégradation du combustible solide qui vient alors alimenter cette dernière. Cette caractéristique constitue la grande différence avec les autres modes de propulsion chimique et la complexité de fonctionnement de ces moteurs. Bien qu'ayant des inconvénients comme la variation des performances propulsives au cours du temps, ce type de propulsion présente des avantages en termes de coûts et de flexibilité la rendant ainsi compétitive vis-à-vis des moteurs-fusées solides et liquides pour des applications comme le tourisme spatial ou les nano-lanceurs.



Figure 1- Moteur hybride de recherche HYCOM de l'ONERA

A cause des ambiances extrêmes rencontrées à l'intérieur des chambres de combustion des moteurs fusées, les mesures pouvant être réalisées sont généralement limitées à des évolutions temporelles de pression et éventuellement de vitesse de régression du combustible. Afin d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques se produisant dans la chambre de combustion de moteurs hybrides, le recours aux simulations numériques est donc indispensable.

Depuis plusieurs années, l'ONERA développe son propre code de mécanique des fluides (CEDRE) dans lequel une condition aux limites de type Arrhénius a été implémentée afin de représenter la dégradation du combustible solide en fonction des conditions de l'écoulement gazeux. Cette dernière permet donc la réalisation de simulations numériques de l'écoulement gazeux à l'intérieur de la chambre de combustion d'un moteur hybride (Figure 2). Par ailleurs, l'ONERA développe également un outil de simulation numérique pour la dégradation des matériaux (MoDeTheC) pouvant être couplé avec CEDRE pour simuler l'interaction entre

l'aérothermochimie (écoulement gazeux avec effets de cinétique chimique) et la réponse thermochimique du matériau. Cet outil, beaucoup plus générique qu'une condition aux limites de type Arrhénius, permet entre autre de prendre en compte la régression du matériau due aux agressions extérieures. Des premiers travaux de couplage entre ces deux codes de calcul pour simuler la chambre de combustion d'un moteur hybride a été réalisé lors deux stages de fin d'étude et ont montré l'originalité, la pertinence et l'importance de cette approche.

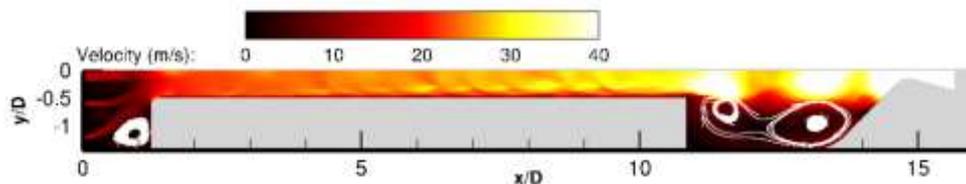


Figure 2- Exemple de champs de vitesse dans la chambre de combustion d'un moteur hybride obtenu avec CEDRE

**L'objectif de la thèse est donc d'améliorer la modélisation et de réaliser des simulations numériques de l'écoulement dans la chambre de combustion d'un moteur hybride couplé à la dégradation du combustible et de les valider.**

Pour cela, le premier travail consistera à poursuivre l'intégration de la loi de pyrolyse représentative de la dégradation du combustible dans le code MoDeTheC et les couplages nécessaires entre ce dernier et CEDRE afin de prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques impactant les transferts de masse et de chaleur à l'interface fluide/combustible (modification de taux de turbulence, etc.). La majeure partie de l'activité sera ensuite consacrée à la réalisation de simulations numériques prenant en compte l'ensemble des phénomènes physiques mis en œuvre dans la chambre de combustion (dégradation du combustible, transferts de masse et de d'énergie entre la paroi et l'écoulement gazeux, transferts radiatifs, réaction chimique, turbulence, etc.). Afin de valider le couplage entre les deux codes et les modèles physiques utilisés, les premières simulations numériques seront comparées aux essais de moteurs hybrides en configuration simplifiée (écoulement totalement gazeux et axial dans la chambre de combustion) disponibles dans la base de données ONERA. Une adaptation voire une modification des outils de post-traitement des résultats expérimentaux sera peut-être nécessaire afin d'obtenir l'ensemble des données nécessaires pour la validation des simulations numériques notamment en terme d'évolution longitudinale et axiale de la vitesse de régression du combustible. Des comparaisons avec des cas plus complexes en terme d'injection de l'oxydant et/ou de géométrie de chambre de combustion seront ensuite être réalisées afin de vérifier la véracité des simulations numériques à restituer les résultats expérimentaux dans différentes configurations.

Enfin, les simulations seront « dégradées » d'un point de vue maillage et modèles utilisés pour limiter le temps de calcul et ainsi permettre l'utilisation du couplage MoDeTheC/CEDRE en tant qu'outil de pré-dimensionnement de chambre de combustion. Les simulations réalisées dans cet optique seront comparées à celles réalisées précédemment pour évaluer l'impact de cette « dégradation ». Cet outil de pré-dimensionnement sera alors utilisé pour déterminer des géométries de la chambre de combustion optimisant les performances propulsives du moteur, la variation du rapport de mélange, etc. Des essais sur le moteur hybride HYCOM seront ensuite être réalisés afin de confronter les résultats numériques et expérimentaux.

#### Collaborations envisagées

-

#### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Multi-Physique pour l'Energétique

Lieu (centre ONERA) : Fauga-Mauzac

**Contact** : Jean-Yves Lestrade

Tél. : 05 61 56 63 62 Email : jean-yves.lestrade@onera.fr

#### Directeur de thèse

Nom : Philippe Villedieu

Laboratoire : ONERA

Email : philippe.villedieu@onera.fr

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