

## PROPOSITION DE SUJET DE THÈSE

### Intitulé : Simulation multiphysique de moteurs fusées à propergol solide

Référence : MFE-DMPE-2026-13  
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2026

Date limite de candidature : 01/07/2026

**Mots clés** Transfert thermique, couplage, propergol solide, simulation, multiphysique

### Profil et compétences recherchées

ingénieur/M2, attrait pour la simulation multiphysique (mécaniques des fluides, écoulements réactifs, thermique...), les méthodes numériques (EDO, EDP), la programmation

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

**Contexte :** Un moteur à propergol solide est un type de moteur fusée largement répandu. Son principe repose sur la combustion d'un matériau énergétique, le propergol. Celui-ci, lorsqu'il est amené à haute température en surface (environ 700 K), se décompose et produit différentes espèces gazeuses qui vont réagir et former une flamme puissante, sans apport d'air extérieur. Cette flamme est attachée à la surface et permet d'en maintenir la température constante par transfert thermique. Elle génère un grand volume de gaz chauds qui sont expulsés à travers une tuyère afin de générer une poussée. L'échauffement initial est généralement effectué sur une petite partie de la surface initiale du bloc, par projection de gaz chauds sur la surface, issus d'un chargement secondaire appelé allumeur. Après allumage de cette zone, la flamme se propage ensuite progressivement à toute la surface du chargement, grâce à l'échauffement progressif de celle-ci par transfert thermique convectif et radiatif. Une fois la combustion établie, la surface du propergol régresse petit à petit, au fur et à mesure que le chargement de propergol est transformé en produits gazeux.

La maîtrise de cette phase d'allumage et de la régression progressive du chargement de propergol est primordiale pour concevoir un moteur robuste et performant. À l'ONERA, une technique de simulation éprouvée consiste à simuler l'écoulement des différents gaz dans la chambre avec le solveur de mécanique des fluides du code CEDRE développé en interne. Le propergol est quant à lui modélisé comme une condition limite, en chaque point de laquelle une équation de transfert thermique unidimensionnelle est résolue afin de capturer l'échange thermique avec les gaz d'allumeur et la montée progressive en température du propergol. Un modèle de flamme permet de capturer le flux thermique généré par celle-ci sans nécessiter la résolution fine et coûteuse de cette flamme dans le solveur fluide.

**Problématique motivant l'étude :** Bien qu'efficace, cette approche a des limites. Il n'est pas possible de prendre en compte des modèles complexes pour le propergol et sa flamme, le transfert thermique latéral (le long de la surface) n'est pas pris en compte, et la régression progressive de la surface du bloc de propergol à mesure que celui-ci se consume n'est pas prise en compte, ce qui rend impossible la simulation de la durée totale d'un tir de moteur. Par ailleurs la modélisation actuelle de l'allumage reste relativement simplifiée, ce qui peut impacter la capacité à reproduire des allumages réels.

**Objectif et axes de recherche :** Afin de remédier à ces limitations, il est proposé dans cette thèse de développer une **nouvelle méthodologie de simulation**. L'idée est de modéliser le chargement de propergol à l'aide du solveur de dégradation thermique des matériaux MoDeTheC, développé à l'ONERA. Ce code, originellement développé pour étudier la tenue au feu des matériaux composites, sera modifié pour y insérer une modélisation adéquate pour les propergols, en tirant avantage des fonctionnalités existantes. **Ce solveur sera couplé au code CEDRE** qui simulera l'écoulement à l'intérieur de la chambre de combustion. Le couplage

permettra de capturer l'interaction entre l'écoulement de gaz chauds et le chargement de propergol. MoDeTheC prenant nativement en compte la régression du matériau, cette approche rendra possible, en particulier, la simulation de la combustion complète d'un chargement dans un moteur. Des simulations de validation du couplage seront effectuées sur différentes configurations représentatives d'un moteur réel. **En fonction du temps disponible, différents aspects pourront alors être approfondis** : modélisation physique, mathématiques appliquées pour les méthodes numériques, optimisation des paramètres des modèles pour reproduire des essais.

Tout d'abord, une étude pourra être consacrée à la restitution de phases d'allumage observées expérimentalement. Dans cette thèse, une fois le bon niveau de modélisation choisi, une méthodologie d'**optimisation des paramètres du modèle de propergol** pourra être mise en place afin de retrouver les vitesses de propagation mesurées sur les bancs d'essai ONERA, en prenant en compte le coût de calcul important lié aux simulations d'allumage en 3D, qui seront alors complétées par d'autres sources de données (essentiellement des essais d'allumage sur échantillon modélisables en 1D). Le but sera de restituer les allumages observés sur des moteurs à propergol pour valider les paramètres obtenus.

Un autre aspect à approfondir est celui de la modélisation de l'allumage et de la combustion des propergols. Des **améliorations à la modélisation initiale** pourront être proposées, notamment via la prise en compte de **phénomènes additionnels** dans le matériau solide (e.g. pyrolyse distribuée). La modélisation initiale est basée sur une hypothèse de propergol homogène, quand bien même les propergols réels sont souvent composites, avec des hétérogénéités à l'échelle microscopique dans le propergol (grains d'oxydant dans une matrice relativement homogène de liant). Une étude pourra donc être menée pour proposer une **approche d'homogénéisation améliorée** et étudier son effet sur la dynamique d'allumage. Enfin, des aspects liés à la nature **diphasique** de l'écoulement produit, mélange de produits de combustion gazeux et liquides, pourront être étudiés, en particulier pour prendre en compte plus finement le **rayonnement** de ceux-ci, qui contribue fortement à la propagation du front d'allumage. Ceci pourra être pris en compte via les solveurs SPIREE (phase liquide dispersée) et REA (rayonnement) de CEDRE. En outre, la thèse pourra aussi s'intéresser à la contribution d'**effets mécaniques** (déformation du bloc durant l'allumage sous la pression, effets d'accélération) sur la combustion, la propagation de l'allumage, et la forme de la régression géométrique obtenue au cours du fonctionnement du moteur.

Enfin, tout au long de la thèse, des aspects de **mathématiques appliquées**, liés aux méthodes numériques utilisées dans les codes couplés ainsi que la **méthode de couplage** elle-même pourront être étudiés, dans le but d'améliorer la précision et la robustesse des calculs. On s'intéressera notamment à l'utilisation d'une méthode de couplage temporel d'ordre élevé et adaptative développée à l'ONERA, et notamment à des aspects de stabilité du couplage (éventuellement via une implicitation itérative), de conservativité, mais aussi d'orchestration globale d'un couplage à plus de 2 codes. Dans ce cadre, un lien avec d'autres activités multiphysiques à l'ONERA nécessitant la réalisation de calculs couplés sera mis en place.

### Collaborations envisagées

- Interaction avec les équipes ONERA développant les outils CEDRE et MoDeTheC et celles impliquées dans la simulation des moteurs fusées.

Laboratoire d'accueil à l'ONERA	Directeur de thèse
Département : DMPE/MPF	Nom : Joël DUPAYS
Lieu (centre ONERA) : Palaiseau	Laboratoire : DMPE - ONERA
<b>Contact</b> : Laurent FRANCOIS	Tél. :
Tél. : 01 80 38 60 58 Email : laurent.francois@onera.fr	Email : joel.dupays@onera.fr

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