

MODÉLISATION DES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES FLUIDE-STRUCTURE ASSOCIÉS À LA DÉGRADATION THERMOCHEMIQUE DES MATÉRIAUX EN RÉGIME HYPERSONIQUE CONTINU LORS DE LA RENTRÉE ATMOSPHÉRIQUE DES DÉBRIS SPATIAUX

Maxime Lalande (ONERA/DMPE - Doctorant 2^{ème} année)

Directrices de thèse : Nathalie Bartoli (ONERA/DTIS) & Ysolde Prévèreud (ONERA/DMPE)

Encadrant : Nicolas Dellinger (ONERA/DMPE)

Référent CNES : Julien Annaloro

Co-financement ONERA/CNES

CONTEXTE ET OBJECTIFS

- Depuis 40 ans, rentrée atmosphérique de 16.000 T de débris. Menace pour la sécurité au sol.
- **Fluide** : déséquilibre thermo-chimique, mélange multi-espèce.
- **Interface** : échanges convecto-diffusifs, interactions physico-chimiques gaz-surface.
- **Solide** : dégradation interne de matériaux composites (pyrolyse, oxydation), dégazage.
- **Effets du dégazage** : injection gaz froid (blocage convectif), modification composition chimique.
- Codes d'analyse de survivabilité des débris spatiaux basés sur des modèles réduits à faible temps de réponse. Influence de la dégradation des matériaux composites non modélisée.

Objectifs : Développer des modèles de substitution basés sur des simulations CFD prenant en compte l'influence de la dégradation thermo-chimique des débris spatiaux sur le flux de chaleur convecto-diffusif.

Cadre de l'étude : Débris de type réservoir en composite carbone/époxy (*Composite Overwrapped Pressure Vessels*). Ré-entrée depuis l'orbite basse, régime hypersonique continu.

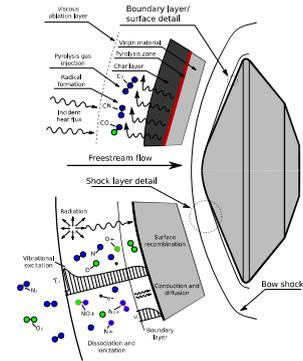


Fig. 1 – Illustration des phénomènes d'interaction fluide-structure (Source : Potter - 2011).

INFLUENCE DU DÉGAZAGE SUR LA MODIFICATION DU FLUX DE CHALEUR CONVECTO-DIFFUSIF

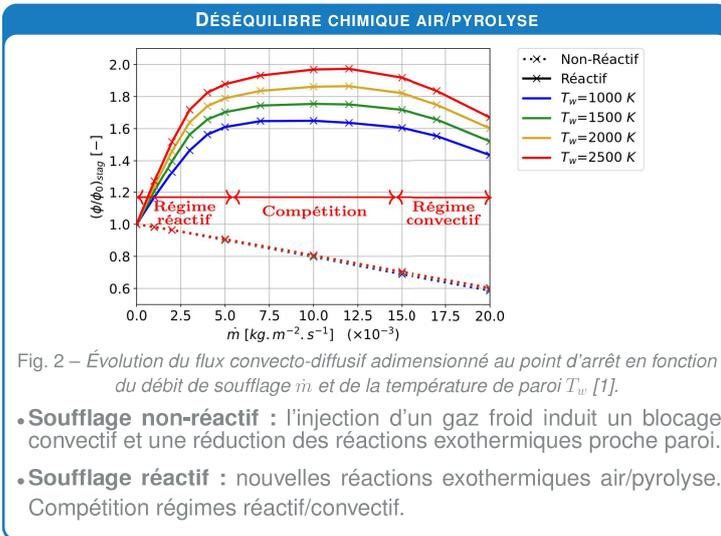


Fig. 2 – Évolution du flux convecto-diffusif adimensionné au point d'arrêt en fonction du débit de soufflage \dot{m} et de la température de paroi T_w [1].

- **Soufflage non-réactif** : l'injection d'un gaz froid induit un blocage convectif et une réduction des réactions exothermiques proche paroi.
- **Soufflage réactif** : nouvelles réactions exothermiques air/pyrolyse. Compétition régimes réactif/convectif.

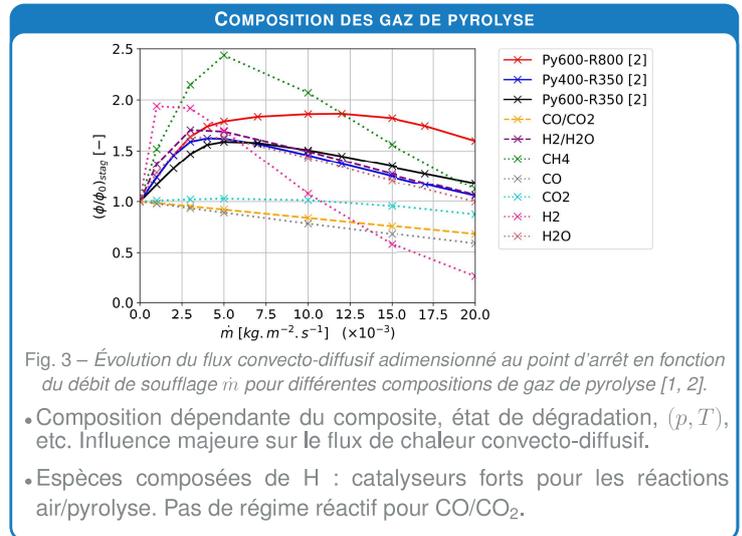


Fig. 3 – Évolution du flux convecto-diffusif adimensionné au point d'arrêt en fonction du débit de soufflage \dot{m} pour différentes compositions de gaz de pyrolyse [1, 2].

- Composition dépendante du composite, état de dégradation, (p , T), etc. Influence majeure sur le flux de chaleur convecto-diffusif.
- Espèces composées de H : catalyseurs forts pour les réactions air/pyrolyse. Pas de régime réactif pour CO/CO₂.

RÉDUCTION DE MODÈLE PAR KRIGEAGE

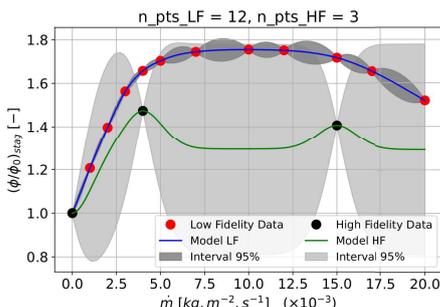


Fig. 4 – Krigeage [3].

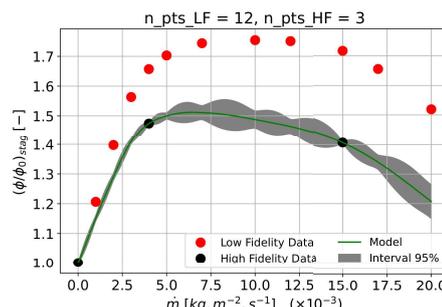


Fig. 5 – Krigeage multi-fidélité [4, 5].

PERSPECTIVES

- Génération d'une base d'apprentissage constituée de simulations CFD prenant en compte l'influence du soufflage des gaz de pyrolyse.
- Simulations couplées fluide/solide. Ajout de l'influence des processus physico-chimiques à la surface : recombinaison catalytique, oxydation, nitruration, sublimation.
- Intégration des modèles réduits dans un code de rentrée atmosphérique.

Références

[1] M. LALANDE et al. "Assessment of Thermochemical Degradation Effects of Charring Material on the Wall Heat Flux during Atmospheric Re-Entry". In : *HISST : 3rd International Conference on High-Speed Vehicle Science & Technology*, 2024, p. 140.
 [2] F. TORRES-HERRADOR et al. "Study of the Degradation of Epoxy Resins Used in Spacecraft Components by Thermogravimetry and Fast Pyrolysis". In : *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 161 (2022), p. 105397. DOI : 10.1016/j.jaap.2021.105397.
 [3] C.E. RASMUSSEN et al. "Gaussian Processes for Machine Learning". In : *Cambridge, MA : MIT Press* (2006).
 [4] L. LE GRATIET. "Multi-Fidelity Gaussian Process Regression for Computer Experiments". Thèse de doct. Université Paris-Diderot (Paris VII), France, 2013.
 [5] P. SAVES et al. "SMT 2.0 : A Surrogate Modeling Toolbox with a focus on Hierarchical and Mixed Variables Gaussian Processes". In : *Advances in Engineering Software* 188 (2024), p. 103571. DOI : 10.1016/j.advengsoft.2023.103571.