



Avis de soutenance – Samy TOUZOIRT

- Date : jeudi 11 juin 2026 à 14h.
- Lieu réservé : Amphi A.
- Titre de thèse en français :

Modélisation multi-physiques de l'oxydation hautes températures des barreaux métalliques

- Titre de thèse en anglais :

Multiphysics modelling of high-temperature oxidation of metal rods

Résumé:

Cette thèse porte sur la combustion des métaux sous oxygène, un enjeu critique pour la sécurité des installations industrielles, médicales, énergétiques et aérospatiales. Malgré l'existence d'essais normalisés, des incidents persistent, révélant les limites d'une approche fondée uniquement sur la classification expérimentale des matériaux. L'ambition de ce travail est de mieux comprendre, prédire et à terme mieux maîtriser le feu d'oxygène dans les métaux massifs, en particulier dans le cas du fer.

Pour dépasser les limites des essais classiques, ce manuscrit développe une approche originale couplant expérimentation et simulation numérique. Son cœur est un modèle multiphysique eulérien de type Phase Field, conçu comme un équivalent numérique du test d'inflammabilité ASTM G124-18 avec allumage laser. Le modèle décrit de manière couplée les transferts thermiques, l'écoulement du bain fondu, le transport de l'oxygène et du fer, la formation et l'évolution de l'oxyde comme phase distincte, ainsi que l'influence de la température sur les propriétés physico-chimiques. Il prend également en compte la phase gazeuse d'oxygène et la possibilité d'un écoulement autour de l'échantillon.

Les résultats montrent qu'un tel modèle permet de reproduire avec une bonne précision les mécanismes majeurs de la combustion du fer sous oxygène : oxydation, allumage, propagation, structure interne du bain, niveaux de température, composition chimique et influence de la pression. La validation est à la

fois qualitative et quantitative à pression atmosphérique, et les essais à haute pression confirment que l'augmentation de l'inflammabilité avec la pression d'oxygène est correctement captée par le modèle. Les développements successifs du modèle permettent en particulier d'identifier le rôle décisif du transport d'oxygène, des effets thermo-capillaires de type Marangoni et de la nucléation de l'oxyde dans la dynamique de combustion.

Au-delà de sa portée scientifique, ce travail ouvre une perspective forte d'application. Le modèle apparaît comme une base crédible pour un futur outil de dimensionnement et de classification numérique des matériaux en service oxygène. Des premiers tests sur d'autres géométries, notamment en configuration de goutte posée, montrent qu'il peut être exporté vers des cas plus proches des installations réelles, comme les parois planes, les conduites, voire d'autres bancs d'essai. À terme, cette approche pourrait déboucher sur des abaques, des corrélations d'ingénierie et des outils numériques rapides d'aide au choix des matériaux, à l'évaluation Burn/No Burn et à la sécurisation des systèmes oxygène.

Mots-clés : combustion des métaux, feu d'oxygène, atmosphère enrichie en oxygène, inflammabilité, fer, oxyde de fer, allumage laser, propagation auto-entretenu, modèle multiphysique, Phase Field, transport d'oxygène, effet Marangoni, nucléation de l'oxyde, haute pression, classification numérique, dimensionnement des installations oxygène.

Abstract:

This thesis addresses metal combustion in oxygen, a major safety issue for industrial, medical, energy and aerospace systems. Although standardized tests are widely used, oxygen-fire incidents still occur, showing the limits of a purely experimental material-classification approach. The aim of this work is to better understand, predict and ultimately control oxygen-driven combustion in bulk metals, with a particular focus on iron.

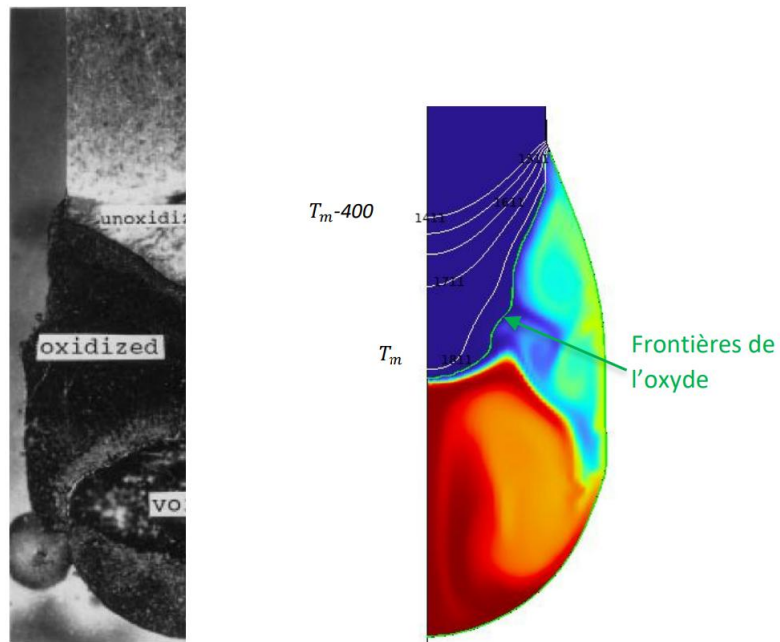
To overcome the limits of conventional testing, the manuscript develops an original combined experimental and numerical strategy. Its core contribution is a multiphysics Eulerian Phase Field model designed as a numerical counterpart of the ASTM G124-18 flammability test with laser ignition. The model couples heat transfer, molten-bath flow, oxygen and iron transport, oxide formation and evolution as a distinct phase, and temperature-dependent thermophysical properties. It also includes the surrounding oxygen gas phase and the possibility of oxygen flow around the sample.

The results show that such a model can reproduce the main mechanisms governing iron combustion in oxygen with good accuracy: oxidation, ignition, self-sustained propagation, internal bath structure, temperature levels, chemical composition and pressure effects. Validation is both qualitative and quantitative at atmospheric pressure, while high-pressure tests confirm that the model correctly captures the increase in flammability with oxygen pressure. The successive developments of the model also highlight the decisive role of oxygen transport, Marangoni-driven thermo-capillary effects and oxide nucleation in combustion dynamics.

Beyond its scientific contribution, this work has strong application potential. The model provides a credible basis for a future digital sizing and material-classification tool for oxygen service. First simulations on alternative geometries, especially a sessile-drop configuration, show that the approach can be transferred to cases closer to real installations, such as flat walls, pipes and even other test rigs. In the longer term, it could support the development of engineering charts, correlations and fast predictive tools for material selection, Burn/No Burn assessment and safer oxygen-system design.

Keywords: metal combustion, oxygen fire, oxygen-enriched atmosphere, flammability, iron, iron oxide, laser ignition, self-sustained propagation, multiphysics model, Phase Field, oxygen

transport, Marangoni effect, oxide nucleation, high pressure, digital classification, oxygen-system design.



Jury:

M. Theodore A. STEINBERG : Président.

Mme. Iryna TOMASHCHUK : Rapporteure.

M. Jérôme FAVERGEON : Rapporteur.

M. Morgan DAL : Directeur.

Mme. Martina RIDLOVA : Co-encadrante.

M. Frédéric COSTE : Co-encadrant.

M. Thomas GHENO : Invité.

M. Gwenael J. CHIFFOLEAU : Invité.