

Allumage et propagation d'un front de "smouldering" en milieu poreux

- Application au problème des feux "zombies" -

1. Contexte

Le risque d'incendie de forêt est particulièrement préoccupant en France, notamment en région Nouvelle-Aquitaine. Ces dernières années ont été marquées par plusieurs incendies d'envergure, notamment ceux de Landiras, La Teste-de-Buch et Saumos en 2022. En raison des spécificités géologiques de certaines zones de la région Nouvelle-Aquitaine, caractérisées par la présence de tourbes et de lignites, un nouveau type de propagation du feu a été observé : les feux "zombies" – Fig.2



FIGURE 1 – Processus de smouldering

Ces incendies souterrains constituent une problématique majeure en raison de leur difficulté de détection et de maîtrise. Ils sont susceptibles de provoquer des reprises de feux de surface initialement considérés comme éteints, comme ce fut le cas à Landiras en 2022, où une résurgence a conduit à la destruction de 7 400 hectares supplémentaires.

Afin de répondre à ces nouveaux enjeux, la région Nouvelle-Aquitaine finance le programme PSGAR (Projet Scientifique de Grande Ampleur) GRIFON (Gestion des Risques multiples en Forêt Nouvelle-Aquitaine) dans lequel s'inscrit ce travail sur les feux zombies.

2. Projet scientifique

Le projet de recherche porte sur l'étude expérimentale et numérique des feux "sous-terrains" appelés également feux "zombies". Ce type d'incendie se développe généralement dans des sols tourbeux riches en matière organique combustible, tels que la lignite.

La combustion souterraine est régie par plusieurs phénomènes couplés :

- Le transport de masse et de chaleur dans le milieu poreux
- Les réactions de pyrolyse de la matière organique
- Les réactions d'oxydation (smouldering) impliquant la diffusion de l'oxygène au sein du milieu poreux (sol)

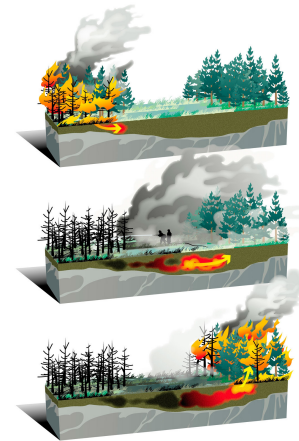


FIGURE 2 – Feux zombie

Ce type de réaction, désigné sous le terme de "smouldering" – Fig.1 – se caractérise par des cinétiques de propagation lentes, facilitée par la nature fortement exothermique du processus. Ces incendies peuvent subsister pendant de longues périodes, même en conditions défavorables (humidité, absence de flux thermique externe) et, dans certaines circonstances, réactiver des feux de surface.

La méthodologie adoptée repose sur l'étude approfondie de trois processus clés :

1. L'allumage du processus de smouldering
2. La propagation du front de réaction (smouldering + pyrolyse),
3. L'inflammation de surface et la transition vers un feu de cime.

Ces trois aspects seront étudiés via une approche combinée :

- Une étude **expérimentale** à l'échelle laboratoire, visant à reproduire et analyser les conditions de développement des feux zombies dans un environnement contrôlé

Allumage et propagation d'un front de "smouldering" en milieu poreux

- Application au problème des feux "zombies" -

- Une étude **numérique**, visant à modéliser la propagation souterraine du feu à l'aide d'outils de simulation avancés

2.1 Etude expérimentale

L'étude repose sur la conception et l'instrumentation d'un banc expérimentale (banc "zombie") permettant de reproduire les conditions favorisant le processus de smouldering dans des sols tourbeux. Le dispositif inclura une instrumentation combinant plusieurs moyens de mesure :

- **Caméras rapide et thermique (IR)** : pour analyser la dynamique spatio-temporelle de l'inflammation et de la propagation du front de smouldering
- **Fluxmètres (radiatifs et convectifs)** : pour caractériser le bilan thermique à la surface du milieu poreux
- **Thermocouples** : pour mesurer le gradient thermique dans l'échantillon et identifier les températures critiques d'initiation du phénomène
- **Analyseurs de gaz (Infra-Rouge à Transformée de Fourier – IRTF)** : pour suivre les réactions de pyrolyse et d'oxydation en temps réel

Les expériences viseront à :

1. Étudier l'influence des conditions environnementales (température, humidité, flux de chaleur) sur l'allumage du front de smouldering
2. Caractériser les mécanismes de propagation en fonction des propriétés du milieu poreux (porosité, composition,...)
3. Analyser les conditions favorisant l'inflammation d'un couvert végétal situé en surface



FIGURE 3 – Cône calorimètre

2.2 Etude numérique

L'approche numérique repose sur le développement et la validation d'un modèle de propagation d'incendie souterrain.

Ce modèle sera implémenté au sein du code de simulation **PATO (Porous Analysis Toolbox based on OpenFOAM)** développé initialement par la **NASA** pour le calcul des boucliers thermiques des véhicules spatiaux.

Des modèles spécifiques ont été implémentés dans le code PATO permettant ainsi de traiter des problèmes de combustion de la biomasse et de propagation des incendies.

La modélisation suivra une approche multi-échelle afin de prendre en compte les différents phénomènes physico-chimiques en jeu :

- **Échelle microscopique** (~ 1 mm) : caractérisation des cinétiques réactionnelles par thermogravimétrie (ATG)
- **Échelle mesoscopique** (~ 10 cm) : caractérisation des transferts de chaleur et de masse à l'aide du cône calorimètre – Fig.3

Allumage et propagation d'un front de "smouldering" en milieu poreux

- Application au problème des feux "zombies" -

- **Échelle macroscopique** (~ 1 m) : modélisation complète du processus de propagation, prise en compte des couplages entre processus physiques.

Le modèle numérique – Fig.4 – sur lequel se base ce travail repose sur une formulation 3D et homogénéisée des équations de conservation au sein du matériau. Un milieu poreux peut être caractérisé par plusieurs échelles spatiales. On peut distinguer les échelles macroscopiques (que l'on regroupe sous la dénomination d'échelle de Darcy), c'est-à-dire les échelles de variation des grandeurs moyennes sur l'étendue de l'échantillon du matériau étudié et des échelles relatives à la morphologie du matériau, de ses grains et de ses pores.

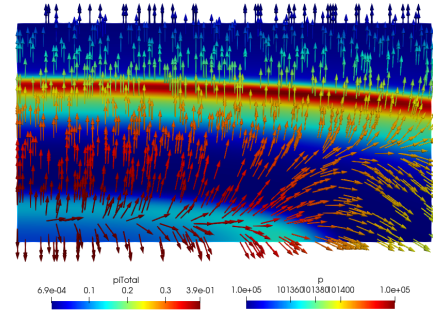


FIGURE 4 – Front de pyrolyse

Dans le cas d'un processus d'homogénéisation, on définit une échelle intermédiaire, petite devant les échelles macroscopiques mais grande devant la plus petite échelle des pores, qu'on appelle échelle du volume élémentaire représentatif (VER). Des théories d'homogénéisation par prise de moyenne volumique sont ensuite utilisées afin d'établir les équations portant sur des variables moyennées à l'échelle d'un VER qui incorporent l'effet des hétérogénéités du milieu. Ces équations font apparaître des propriétés effectives dépendant des propriétés locales du milieu et de sa morphologie.

Chaque gaz est transporté séparément au sein du milieu poreux au travers les phénomènes diffusifs et convectifs; ces gaz provenant des réactions de pyrolyse et des réactions hétérogènes (smouldering). Une formulation générale du mécanisme réactionnel est adoptée afin de prendre en compte des schémas détaillés mélangeant des réactions "compétitives" et "consécutives". Une équation de pression est résolue et la vitesse du gaz est calculée à l'aide d'une loi de Darcy. L'énergie est calculée sous la forme d'une enthalpie sensible du volume gazeux.

Actuellement le modèle repose sur une hypothèse d'équilibre thermique locale, les gaz traversant le matériau sont supposés être à la même température que les phases condensées. De manière analogue, on fait également l'hypothèse d'équilibre compositionnel local, les réactions hétérogènes sont exprimées vis-à-vis des concentrations d'espèces gazeuses moyennes et non des concentrations à l'interface. Cependant, ce travail vise à implémenter au sein du modèle les réactions de type "smouldering" pour lesquelles les deux hypothèses citées ci-dessus sont questionnables. Un modèle à deux températures sera donc développé afin de tenir compte des échanges de chaleur entre le gaz et les phases condensées. L'effet de l'écart entre la concentration pariétale et la concentration moyenne du gaz sur la réaction de smouldering sera également étudié.

Enfin la dernière étape considérera l'inflammation d'un lit végétal de surface. Le modèle PATO sera couplé au solveur **FireFOAM** de la plateforme **OpenFOAM** permettant le calcul de combustion en phase gazeuse.

3. Conclusion et perspectives

Cette étude permettra de mieux comprendre les mécanismes physico-chimiques gouvernant la propagation des feux zombies. Elle offrira des avancées significatives en matière de prévention et de lutte contre ces incendies, en proposant des outils prédictifs pour anticiper leur évolution et optimiser les stratégies d'extinction.

Allumage et propagation d'un front de "*smouldering*" en milieu poreux

- Application au problème des feux "zombies" -

4. Informations diverses

- ✓ Début du contrat : Septembre 2025
- ✓ Lieu : ENSMA, Institut P' – UPR 3346 – CNRS, Poitiers, France
- ✓ Salaire : 2300 euros brut / mois
- ✓ Contacts :

Franck RICHARD, franck.richard@univ-poitiers.fr

Thomas ROGAUME, thomas.rogaume@univ-poitiers.fr

Benjamin BATIOT, benjamin.batiot@univ-poitiers.fr