

Propagation d'une flamme le long d'une paroi combustible

- Application au problème d'interface feux de forêt / habitat -

1. Contexte

Le risque d'incendie de forêt est particulièrement présent au sein de la région Nouvelle-Aquitaine en France. Ces dernières années ont d'ailleurs été marquées par plusieurs incendies d'ampleur comme ceux de Landiras en 2022. L'impact de ces incendies sur l'environnement est une problématique importante. Parmi ces impacts, on peut noter celui de la vulnérabilité du bâti qui s'accroît en raison de l'augmentation des zones d'interface forêt-habitat. Le retour d'expérience montre que 80% des feux se déclenchent à moins de 50 mètres des habitations confirmant ainsi que la problématique de la vulnérabilité du bâti face à l'aléa "feux de forêt" est un enjeu majeur. Deux facteurs impactent à la hausse cette vulnérabilité ; le changement climatique, qui accroît les zones sujettes au risque incendie, et l'aménagement croissant des zones péri-urbaines conduisant à de l'habitat groupé ou diffus, voire du mitage.

Ce constat fait peser un risque accru sur la lutte incendie. En effet, malgré l'importance des moyens engagés, tous les bâtiments ne peuvent plus être protégés. Ce phénomène commence à apparaître depuis quelques années en France et est déjà intégré comme étant la norme en Catalogne espagnole, aux USA ou en Australie par exemple.

Le projet scientifique porte sur l'étude de la vulnérabilité du bâti face à l'aléa "feux de forêt". Deux facteurs peuvent limiter cette vulnérabilité : réduire l'intensité de l'incendie et limiter sa propagation aux abords du bâti (e.g., réduction de la biomasse et des vecteurs de propagation, comme la végétation ornementale, ou augmentation de la distance de débroussaillage) et privilégier des solutions constructives limitant l'inflammabilité et la combustibilité des bâtiments. Les actions sur l'intensité de l'incendie et sur sa propagation sont définies au travers des codes forestier et de l'urbanisme en termes de gestion des OLD (Obligations Légales de Débroussaillage), des coupures de combustible, et d'accès aux services d'incendie et de secours. Cependant, les règles actuelles d'OLD comportent des directives de débroussaillage de profondeur fixe, indépendante de la configuration environnementale du site, ce qui peut conduire à un sous-dimensionnement de l'ouvrage ou, dans le cas contraire, à des coûts de nettoyage excessifs. De plus, la réglementation des solutions constructives est plutôt mal définie et peu contrôlée. Le travail sur la résistance au feu des solutions constructives mises en œuvre reste donc un enjeu majeur face à l'aléa "feu de forêt". Les constructions en matériaux biosourcés prennent une place de plus en plus importante dans les nouvelles constructions. Malgré l'intérêt indéniable de ce type de matériaux concernant leur empreinte environnementale, d'importantes questions se posent quant à leur implantation dans des zones à risque d'incendie de forêt. Lors d'un incendie, les éléments constructifs d'une habitation les plus exposés sont principalement les façades. Le projet portera sur cette configuration pour laquelle deux aspects seront étudiés : les conditions d'inflammation et de propagation de la flamme le long de la façade d'une habitation. Le cas d'étude d'un bardage de bois de douglas sera considéré, constituant l'essence la plus répandue au sein de la Région Nouvelle Aquitaine dans la construction de façades en matériau bio-sourcé.



FIGURE 1 – Wall flame bench scale

2. Projet scientifique

Dans le cas d'une propagation de flamme à la surface d'un solide, une couche limite s'établit au sein de laquelle de nombreux processus physico-chimiques interagissent (turbulence, rayonnement, combustion,...). Le couplage entre la phase condensée (matériau solide) et la couche limite de la phase gazeuse de combustion est crucial dans le développement et la propagation de la flamme à la surface du matériau. Cette propagation peut être considérée comme un front d'allumage en mouvement sur lequel le bord d'attaque de la flamme agit à la fois comme source de chaleur permettant d'échauffer le matériaux jusqu'à sa température d'inflammation et comme source d'allumage pilote. La propagation dépend donc des phénomènes physico-chimiques en phase gazeuse de combustion, en phase condensée et également des échanges (transferts de masses et de chaleur) à l'interface. Le bord d'attaque de la flamme est "*accrochée*" à la zone de pyrolyse, la combustion est laminaire et la convection est le mode de transfert de chaleur dominant entre la flamme et le solide.

En amont, l'écoulement devient turbulent en raison de la prédominance des forces de flottabilités. Le transfert de masses issu des réactions de pyrolyse agit fortement sur la couche limite en raison notamment de la direction perpendiculaire de la vitesse d'éjection des gaz de pyrolyse par rapport à la couche limite impactant ainsi fortement le transfert convectif. Les processus physico-chimiques à cette interface jouent donc un rôle majeur sur le développement de la flamme. Le travail au sein de ce projet a pour objectif le développement d'un modèle couplé des effets physiques en phase condensée, en phase gazeuse ainsi qu'à l'interface afin d'étudier les mécanismes et paramètres clés à gouvernant l'inflammation et la propagation de la flamme le long d'une façade lors d'un incendie. L'identification de ces paramètres permettra d'orienter le développement de matériaux et solutions constructives performantes et résilientes en cas d'incendie de forêt.

Le projet porte à la fois sur une étude expérimentale et numérique de la configuration définie (feux de façade). Afin d'étudier la propagation de flamme sur un combustible solide, un banc expérimentale a été développé au laboratoire (Fig.1). Ce banc est composé d'une plaque porte-échantillon en silicate de calcium, assurant ainsi des conditions limites "*contrôlées*" pour la modélisation. Un brûleur radiant poreux assure l'allumage et le maintien de la flamme à la surface du solide et son inclinaison par rapport à la surface du matériau assure la propagation de la flamme. Les conditions d'utilisation du brûleur (puissance, inclinaison) pourront varier afin de simuler différents scénarios de feux de forêt environnant.

Deux conditions seront étudiées. Dans un premier temps, des essais seront réalisés sur une plaque inerte afin de caractériser les couches limites aérauliques et thermiques induites par le panneau radiant en l'absence de flamme, puis la configuration avec la paroi combustible en bois (douglas) sera étudiée. Lors de la propagation de flamme, trois phénomènes seront principalement étudiés :

- **Le phénomène de carbonisation** de la phase condensée et son influence sur la structure de flamme.
- **La structure de flamme** caractéristique d'une configuration de propagation verticale induisant des zones laminaires, des zones transitoires laminaires/turbulentes et des zones

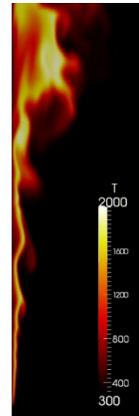


FIGURE 2 –
Wall flame
bench scale

Propagation d'une flamme le long d'une paroi combustible

- Application au problème d'interface feux de forêt / habitat -



pleinement turbulentes.

— Les échanges à l'interface solide / gaz

Différents systèmes de mesure seront ainsi utilisés pendant les essais. Une balance enregistrera la perte de masse de l'échantillon en fonction du temps, des thermocouples seront insérés le long de l'axe central vertical à différentes positions à travers l'épaisseur du solide afin de capter la dynamique du transfert de chaleur au sein de la phase condensée. Des thermocouples seront également utilisés dans la phase gazeuse pour mesurer les températures de la flamme, ainsi qu'une caméra infrarouge pour extraire les champs de températures en 2D. Un système PIV pourra éventuellement être utilisé pour extraire les champs de vitesses dans la phase gazeuse. Afin d'étudier les processus physico-chimiques à l'interface solide-gaz, des fluxmètres convectifs et radiatifs seront insérés à la surface du solide et des mesures de gaz seront réalisées. Le processus d'inflammation sera quant à lui caractérisé à l'aide d'une caméra rapide.

Dans un second temps, un modèle numérique sera développé permettant de simuler l'expérience mise en œuvre. Un modèle détaillé a été développé au sein de l'équipe permettant de décrire la dégradation thermique d'un matériau poreux sous l'effet de la chaleur. Ce modèle s'appuie sur le code PATO (Porous Analysis Toolbox based on OpenFOAM) développé initialement par la NASA pour le calcul des boucliers thermiques des véhicules spatiaux. Ce code a été adapté pour le calcul de cas représentatifs des conditions rencontrées en incendie et des sous-modèles spécifiques ont été implantés; comme des schémas réactionnelles de pyrolyse à chimie finie ou encore des réactions hétérogènes de formation de char secondaire. Le modèle numérique 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. 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 dépendantes 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. Une formulation générale du mécanisme réactionnel est adoptée afin de prendre en compte des schémas détaillés combinant 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. Dans le cadre de ce travail, le code PATO sera couplé au code FireFOAM, initialement développé par FM Global pour le calcul de la phase gazeuse de combustion. La condition de couplage à l'interface sera traitée par échelle de complexité

Propagation d'une flamme le long d'une paroi combustible

- Application au problème d'interface feux de forêt / habitat -



croissante. Dans un premier temps, on considérera le transfert de masses unilatéral de la phase solide vers la phase gazeuse et le transfert de chaleur de la flamme vers la surface du solide. Puis dans un deuxième temps on traitera les échanges multi-latérales (transferts de masses et de chaleur) entre les deux phases. Le code FireFOAM est basé sur une description aux grandes échelles (LES) des équations de conservation. La turbulence sera traité par le modèle WALE, la combustion par le modèle de chimie infiniment rapide EDC et le rayonnement par la méthode des ordonnées discrètes considérant le milieu comme optiquement mince. Une attention particulière sera porté sur la modélisation du transfert convectif. Deux stratégies peuvent être employées : (1) soit le maillage est suffisamment fin en proche paroi ce qui permet de capter les gradients de vitesse et de température à l'interface et donc le calcul direct des contraintes de cisaillement et du flux convectif à l'interface, (2) soit les contraintes de cisaillement et le flux convectif sont obtenus aux travers de modèles de paroi. La plupart du temps ces modèles se basent sur des théories classiques de couche limite ce qui est questionnable dans le cas ou une injection pariétale de gaz de pyrolyse existe. En croisant les deux approches, la pertinence des modèles de paroi classiquement utilisés sera évaluée. Le modèle de combustion est également questionnable dans ce type de cas. En effet, le taux de réaction est gouverné par un temps caractéristique de mélange turbulent et l'utilisation de ce type de modèle pose question dans les zones ou la combustion est laminaire. L'incorporation de la diffusion moléculaire au sein du modèle permet de traiter "*un peu mieux*" ces zones laminaires. L'impact d'un tel modèle sera également évalué sur la description des phénomènes physico-chimique à l'interface.

3. Conclusion

Ce projet vise à approfondir notre compréhension de la propagation de flamme le long d'une façade et à identifier les paramètres clés qui l'influencent. En combinant des approches expérimentales et numériques, cette étude contribuera au développement de matériaux de construction plus résilients et à l'élaboration de stratégies optimisées pour atténuer le risque en cas d'incendie de forêt.

Contacts :

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

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

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