



**HAL**  
open science

## Études numériques des feux extrêmes

Jacky Fayad

► **To cite this version:**

Jacky Fayad. Études numériques des feux extrêmes. Sciences de la Terre. Université Pascal Paoli, 2023. Français. NNT : 2023CORT0015 . tel-04461572

**HAL Id: tel-04461572**

**<https://theses.hal.science/tel-04461572>**

Submitted on 16 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**UNIVERSITE DE CORSE-PASCAL PAOLI**  
**ECOLE DOCTORALE ENVIRONNEMENT ET SOCIETE**  
**UMR CNRS 6134 SPE**



**Thèse présentée pour l'obtention du grade de**  
**DOCTEUR EN Mécanique des fluides, Energétique,**  
**Thermique, Combustion, Acoustique**  
**Mention : Energétique, Génies des procédés**

**Soutenue publiquement par**

**JACKY FAYAD**

le 20 Décembre 2023

---

**ÉTUDES NUMÉRIQUES DES FEUX EXTRÊMES**

---

**Directeurs :**

M Jean-Louis ROSSI, Dr-HDR, Université de Corse  
M François-Joseph CHATELON, Dr, Université de Corse

**Rapporteurs :**

Mme Anne GANTEAUME, DR, INRAE – Aix-en-Provence  
M Khaled CHETEHOUNA, Pr, INSA Centre Val de Loire – Campus de  
Bourges

**Jury**

M Gilbert ACCARY, Pr, Lebanese American University  
M Khaled CHETEHOUNA, Pr, INSA Centre Val de Loire – Campus de  
Bourges  
Mme Anne GANTEAUME, DR, INRAE – Aix-en-Provence  
M Sofiane MERADJI, Docteur-IGR, Université de Toulon  
M Dominique MORVAN, Pr, Aix-Marseille Université  
Mme Lucile ROSSI, Pr, Université de Corse  
M Jean-Louis ROSSI, Dr-HDR, Université de Corse  
M Paul-Antoine SANTONI, Pr, Université de Corse

# Remerciements

---

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse, le Dr Jean-Louis Rossi et le Dr François-Joseph Chatelon, pour m'avoir faite confiance et m'avoir guidée, encouragée et conseillée durant mes années de thèse. Leur aide et leurs précieux conseils m'ont permis de mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont ensuite au responsable du projet Feux, ainsi qu'à chaque membre de cette équipe pour m'avoir accueillie.

Je tiens à remercier le Professeur Gilbert Accary et le Professeur Dominique Morvan pour leur aide et leurs conseils dans la compréhension et l'utilisation des codes numériques.

Je tiens à exprimer aussi mes plus vifs remerciements au Dr Thierry Marcelli, et au Professeure Lucile Rossi pour leur aide au cours de ma thèse.

Je remercie Madame Anne Ganteaume et Monsieur Khaled Chetehouna pour l'attention qu'ils témoignent à ce travail en acceptant d'en être les rapporteurs.

Je tiens à remercier aussi Monsieur Gilbert Accary, Monsieur Khaled Chetehouna, Madame Anne Ganteaume, Monsieur Sofiane Meradji, Monsieur Dominique Morvan, Madame Lucile Rossi-Tison et Monsieur Paul-Antoine Santoni pour la participation au Jury.

Finalement, je veux remercier ma famille au Liban, Abdallah, Janine, Lamice, Tony, Antonella et Charbel pour tout leur soutien et leurs encouragements. Et de même, je remercie ma seconde famille en Corse, Carmen Awad, Nicolas Frangieh, et tous mes amis et mes collègues qui ont rendu mon séjour en Corse agréable.

# Résumé

---

Les feux extrêmes sont des feux caractérisés par une forte puissance et une vitesse de propagation élevée qui rendent les moyens de lutte impuissants. Ces phénomènes entraînent une augmentation des dégâts et du nombre de décès civils et opérationnels, et perturbent les écosystèmes ainsi que nos sociétés. Il existe plusieurs types de feux extrêmes, dont les feux de forte puissance qui sont l'objet de cette thèse. Ce type de feux constitue un réel risque, étant donné l'augmentation de sa fréquence et son impact dans le monde entier. Par conséquent, l'évaluation des conditions de propagation qui peuvent déclencher un feu de forte puissance, s'avère très utile dans le but d'anticiper ces phénomènes. De plus, l'étude du comportement d'un feu de forte puissance (vitesse de propagation, intensité et impact) est susceptible de fournir des renseignements aux opérationnels en phase de lutte.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier la propagation des feux de forte puissance à l'aide des feux expérimentaux réalisés à l'échelle du terrain sur du maquis Corse « *Genista salzmannii* ». Ces expériences ont été menées lors des deux saisons (hiver et automne), dans deux régions différentes de l'Île (Nord-Ouest et Sud-Ouest de la Corse), selon un protocole expérimental et des techniques qui permettent d'évaluer la dynamique et l'impact de ces feux.

À la suite des expériences, des études numériques ont été menées à l'aide des codes physiques complets FireStar2D et 3D, basés sur une approche multiphasique, afin de tester la pertinence de ces modèles de propagation dans la prédiction du comportement des feux expérimentaux de forte puissance. Les différents résultats numériques obtenus pour les trois configurations choisies, ont montré une bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. Ceci montre que ces modèles peuvent être utilisés pour étudier d'autres configurations sans

avoir forcément recours aux expériences. Les campagnes de feux réalisées étaient représentatives des feux de forte puissance, qui ont eu lieu malgré des conditions marginales de propagation dues à des vitesses de vent faibles, des teneurs en eau du combustible ainsi que des humidités relatives de l'air élevées. Ces expériences pourront également fournir des observations détaillées, utiles pour améliorer la modélisation. Ceci représente une avancée significative, étant donné la complexité et les difficultés de la mise en œuvre des expériences sur le terrain.

La deuxième partie de la thèse a porté sur une étude numérique d'un « cas critique » d'un feu de forte puissance. Ce feu a été étudié suivant plusieurs approches : empiriques, physiques complètes et simplifiées. En particulier, FireStar2D et 3D et le modèle physique simplifié de Balbi ont été mis en œuvre. Plusieurs paramètres ont ainsi été évalués par les différentes approches, dont la vitesse de propagation, l'intensité du front de flammes, la géométrie du front et de la flamme (longueur et inclinaison). L'objet principal de cette étude, était non seulement d'évaluer le comportement mais surtout l'impact de ce feu de forte puissance sur deux cibles : un corps humain et un bâtiment de quatre étages. Cela a permis d'établir des corrélations qui lient les flux de chaleur totaux reçus par les cibles en fonction de leur position du front de feu. L'objectif était d'évaluer la distance de sécurité autour des interfaces forêt-habitat, en considérant la valeur maximale tolérable du flux de chaleur thermique, qui peut être reçu par la cible sans causer de dommages. Les distances de sécurité évaluées à l'aide de cette méthodologie, pour un pompier et un bâtiment, sont inférieures à 50 mètres. Ceci confirme, pour cette configuration, l'efficacité de la valeur de la distance de sécurité autour des habitations, fixée par les experts opérationnels et supposée égale à un minimum de 50 m en France.

Les résultats de ce travail de recherche sont encourageants et d'un grand intérêt pour les opérationnels impliqués dans l'aménagement du territoire et la lutte contre les incendies, en particulier au niveau des interfaces entre la forêt et l'habitat.

**Mots clés :** distance de sécurité, feux expérimentaux, feu de forte puissance, interface forêt-habitat, modélisation des feux, simulation numérique.

# Abstract

---

Extreme fires are characterized by their high intensity and rate of spread, which overwhelm firefighting resources. These phenomena result in increased damage, civilian and operational fatalities and disruption to ecosystems, human life and the economy. There are several types of extreme fires, including high-intensity fires, which are the main subject of this thesis. This type of fire presents a real risk, given the increase in its frequency and scale throughout the world. Consequently, it is very useful to assess the conditions of propagation that can trigger a high-intensity fire in order to be able to anticipate these phenomena. In addition, studying the behavior of a high-intensity fire (rate of spread, intensity and impact) can provide information to operational staff during the firefighting phase.

The main aim of this thesis is to study the propagation of high-intensity fires by means of experimental fires carried out on a field scale on Corsican shrub species named '*Genista salzmannii*'. These experiments were carried out during two periods (winter and autumn), in two different regions: North-West and South-West of Corsica, using an experimental protocol and technologies that make it possible to assess the dynamic and impact of these fires.

Following the experiments, numerical studies were carried out using fully physical fire models based on a multiphase formulation, FireStar2D and 3D, in order to test the relevance of these propagation models in predicting the behavior of these experimental fires. The different numerical results obtained for the three terrain configurations chosen were in agreement with the experimental results. This shows that these models can be used to study other configurations without necessarily having to resort to experiments. The fire campaigns carried out were representative of high-intensity fires that occurred despite marginal propagation conditions

related to low wind speeds, high fuel moisture content and relative air humidity. These experiments can also provide detailed observations, as well as input data that can be used in modelling, given that carrying out such experiments is not easy and is always subject to difficulties and constraints.

The second part of the research focused on a numerical study of a "critical case" of a high-intensity fire. This fire was studied using several empirical approaches, fully physical models found in the literature, in particular FireStar2D and 3D and the simplified physical Balbi model. Several parameters were evaluated using the different approaches, including the rate of spread, the intensity of the flame front, the geometry of the front and of the flame (length and tilting). The main aim of this study was to assess not only the behavior but also the impact of this high-intensity fire on two different targets: the human body and a four level building. This made it possible to establish correlations between the total heat fluxes received by the targets as a function of their position in front of the fire. The aim was to assess the safety distance around wildland urban interfaces by considering the maximum tolerable value of thermal heat flux that can be received by the target without causing damage. The safety distances assessed using this methodology, for a firefighter and a building, are less than 50 meters. This confirms, for this configuration, the effectiveness of the value of the safety distance around buildings, set by operational experts and assumed to be equal to a minimum of 50 m in France.

The results of this research work are encouraging and of great interest to those involved in land-use management and fire-fighting, in terms of the behavior of high-intensity fires and their impact, particularly at the wildland urban interfaces.

**Keywords:** experimental fires, high-intensity fires, numerical simulation, fire modelling, safety distance, wildland urban interface.

# Table des matières

---

<b>Remerciements</b> .....	<b>i</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>vii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>xi</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>xviii</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>xxi</b>
<b>Contexte général</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I. Introduction</b> .....	<b>5</b>
I.1 Le couvert végétal dans les zones où règne un climat méditerranéen .....	5
I.2 Principe de propagation des feux de forêt .....	6
I.3 Facteurs qui influent sur la propagation du feu .....	8
I.4 Les caractéristiques principales d'un feu de forêt .....	11
I.5 Les feux hors-normes .....	13
I.5.1 Contexte général .....	13
I.5.2 Les types de feux extrêmes .....	17
I.5.3 Augmentation du risque dû aux feux extrêmes .....	24
I.5.4 Influence de la topographie sur le comportement des feux extrêmes .....	28
I.5.5 Conséquences des feux extrêmes .....	29
I.5.6 Techniques de réduction du risque lié aux incendies de forte puissance .....	32

I.6 La modélisation : anticipation du risque incendie par différentes approches .....	35
I.7 Apport du travail et plan du mémoire .....	39
<b>Chapitre II. Modèles physiques pour simulations numériques.....</b>	<b>42</b>
II.1 Présentation du modèle FireStar .....	42
II.1.1 Modélisation mathématique.....	46
II.1.2 Méthodes numériques employées .....	61
II.2 Modélisation physique simplifiée .....	66
II.2.1 Description du modèle de Balbi.....	68
II.2.2 Les principales équations du modèle .....	74
<b>Chapitre III. Études expérimentales à l'échelle du terrain .....</b>	<b>76</b>
III.1 Méthode expérimentale .....	82
III.1.1 Le protocole expérimental .....	82
III.1.2 Caractérisation de la végétation.....	85
III.1.3 Météorologie.....	87
III.1.4 Évaluation du ROS : drones et technologie de vision .....	88
III.1.5 Mesures des flux thermiques .....	89
III.2 Difficultés et contraintes.....	90
III.3 Résultats expérimentaux : végétation, météorologie et topographie.....	91
<b>Chapitre IV. Études numériques des feux expérimentaux .....</b>	<b>93</b>
IV.1 Domaines de calcul et configurations numériques.....	93
IV.1.1 FireStar2D .....	93
IV.1.2 FireStar3D .....	95

IV.2 Méthodes d'évaluation des paramètres caractérisant le comportement du feu	97
IV.2.1 Vitesse de propagation : ROS .....	97
IV.2.2 Intensité du front de flammes.....	98
IV.2.3 Flux thermiques.....	99
<b>Chapitre V. Résultats et discussions .....</b>	<b>101</b>
V.1 Vitesse de propagation : ROS.....	101
V.2 Intensité du feu .....	107
V.3 Flux thermiques et impact du feu .....	111
V.4 Géométrie de la flamme et périmètre du front .....	117
V.5 Tests de certains choix de paramètres .....	121
V.5.1 Choix du maillage.....	121
V.5.2 Méthode d'allumage .....	122
V.6 Conclusion .....	125
<b>Chapitre VI. Expertise scientifique sur Sari-Solenzara.....</b>	<b>128</b>
VI.1 Contexte général.....	128
VI.2 Étude de la dynamique du feu .....	129
VI.2.1 Caractéristiques du « cas critique » étudié .....	129
VI.2.2 Implémentation dans les modèles physiques .....	132
VI.2.3 Approches théoriques et résultats.....	134
VI.2.4 Conclusions .....	149
VI.3 Étude de l'impact du feu .....	151
VI.3.1 Description des cibles.....	154

VI.3.2 Approche numérique .....	155
VI.3.3 Résultats et discussions .....	157
VI.3.4 Analyse de sensibilité globale .....	165
VI.3.5 Conclusions .....	168
<b>Conclusions et perspectives .....</b>	<b>171</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>180</b>

# Liste des figures

---

<b>Figure I-1.</b> Différents écosystèmes du couvert végétal méditerranéen (Crédit : <a href="https://www.animateur-nature.com/telechargements/pfci/PFCI_1_Mecanismes-du-feu.pdf">https://www.animateur-nature.com/telechargements/pfci/PFCI_1_Mecanismes-du-feu.pdf</a> ) ..	6
<b>Figure I-2.</b> Différentes étapes de la propagation du feu : (a) réchauffement du combustible ; (b) évaporation de l'eau contenue dans le combustible ; (c) étape de pyrolyse ;(d) étape de combustion .....	7
<b>Figure I-3.</b> Triangle du feu appliqué à l'échelle des feux de végétation.....	8
<b>Figure I-4.</b> Représentation d'un feu de sol (crédit :“alpes-maritimes.gouv.fr“) .....	9
<b>Figure I-5.</b> Représentation d'un feu de surface (crédit :“alpes-maritimes.gouv.fr“) .....	10
<b>Figure I-6.</b> Différents types des feux de cimes (selon (Van Wagner 1977)) : (a) passif ; (b) actif ; (c) Indépendant .....	10
<b>Figure I-7.</b> Représentation schématique des différentes caractéristiques d'une flamme .....	12
<b>Figure I-8.</b> Représentation d'un feu de tranchée ( <a href="https://youtu.be/PSmeg-vn6ho">https://youtu.be/PSmeg-vn6ho</a> ).....	19
<b>Figure I-9.</b> Un tourbillon de feu à Chillicothe, Missouri (États-Unis). (Photograph: Janae Copelin/Barcroft US) .....	22
<b>Figure II-1.</b> Champs de températures et lignes de courants obtenus par simulation numérique sur FireStar2D (Awad <i>et al.</i> 2021) .....	45
<b>Figure II-2.</b> Champs de températures et lignes de courants obtenus par simulation numérique sur FireStar3D dans les plans : (a) Z-Y ; (b) X-Y (Frangieh <i>et al.</i> 2020a) .....	46
<b>Figure II-3.</b> Structuration des maillages de la phase gazeuse (—) et celui de la phase solide (●) dans le plan xy, avec les positions déplacées des variables dans la phases gazeuse (variables scalaires $\phi$ et composantes de vitesses u et v) .....	62

<b>Figure II-4.</b> Structure du maillage de la phase gazeuse avec les différentes notations dans la direction $x > 0$ .....	64
<b>Figure II-5.</b> Représentation schématique de la zone de combustion adoptée dans le modèle	70
<b>Figure III-1.</b> Différentes Parcelles brûlées lors des travaux expérimentaux réalisés à : (a) Speluncatu (04 et 05 mars 2021) ; (b) Speluncatu (25 et 26 Octobre 2021) ; (c) Letia (14 et 15 mars 2022).....	82
<b>Figure III-2.</b> Vue schématique de la parcelle expérimentale et de l'emplacement des dispositifs de mesure.....	84
<b>Figure III-3.</b> Vue du site expérimental (Letia Octobre 2021) obtenue à l'aide de Google Earth et les principales relevés GNSS sur le terrain .....	84
<b>Figure III-4.</b> Parcelle de <i>Genista Salzmännii</i> (Speluncatu, haute-Corse).....	85
<b>Figure III-5.</b> Séchage des échantillons dans l'étuve pour l'évaluation de : (a) la charge surfacique, (b) la teneur en eau .....	86
<b>Figure III-6.</b> Mesure de la hauteur de la végétation sur le terrain .....	87
<b>Figure III-7.</b> Anémomètre bidimensionnel situé à 3 m du sol pour mesurer la vitesse et la direction du vent.....	88
<b>Figure III-8.</b> Station météo (Kestrel 5500) .....	88
<b>Figure III-9.</b> Positionnement des piquets servant pour la détermination de la vitesse de propagation du front de flammes .....	89
<b>Figure III-10.</b> Capteurs de flux radiatifs et totaux fixés sur des supports et protégés par des feuilles d'aluminium .....	90
<b>Figure IV-1.</b> Représentation du domaine et des conditions aux limites correspondants aux simulations numériques avec FireStar2D.....	94
<b>Figure IV-2.</b> Représentation du domaine et des conditions limites correspondants aux simulations numériques avec FireStar3D.....	96

<b>Figure IV-3.</b> Maillage de la phase gazeuse dans le plan (XZ) sur FireStar3D .....	97
<b>Figure V-1.</b> Images infrarouges du front de flammes entre des positions équidistantes (les lignes vertes passant par des piquets préfixés) à différents instants en prenant $t = 0$ s à 12 :49 (heure de la mise à feu) :(a) $t = 140$ s ; (b) $t = 242$ s ; (c) $t = 360$ s ; (d) $t = 422$ s.....	102
<b>Figure V-2.</b> Variations dans le temps du point le plus éloigné du front de pyrolyse sur la surface du combustible obtenues avec FireStar2D après la mise à feu .....	103
<b>Figure V-3.</b> Variations dans le temps du point le plus éloigné du front de pyrolyse sur la surface du combustible obtenues avec FireStar3D après la mise à feu .....	103
<b>Figure V-4.</b> Champs de températures et lignes de courants obtenus avec FireStar2D (Mars 2021).....	104
<b>Figure V-5.</b> Évaluation 3D du front de feu pour une surface isotherme $T = 1000$ K (à gauche), et vue du dessus représentant les champs de températures et les lignes de courant de la phase gazeuse obtenus dans le plan horizontal ( $z = e$ (m)) (à droite) : (a) Octobre 2021 ; (b) mars 2022 .....	105
<b>Figure V-6.</b> Évolution dans le temps du transfert de chaleur radiatif et convectif entre la flamme et la végétation évalué sur firestar2D : (a) Speluncatu (Mars 2021) ; (b) Speluncatu (Octobre 2021) ; (c) Letia (Mars 2022).....	107
<b>Figure V-7.</b> Parcelle : (a) avant le brûlage et (b) après le brûlage, permettant une estimation visuelle du pourcentage de combustible consommé par le feu .....	108
<b>Figure V-8.</b> Variation dans le temps du taux de dégagement de chaleur (HRR) durant les expériences d’Octobre 2021 et Mars 2022, évalué sur FireStar3D.....	109
<b>Figure V-9.</b> Développement du front de flammes évalué sur FireStar3D durant les expériences du terrain : (a) Octobre 2021 ; (b) Mars 2022 .....	109
<b>Figure V-10.</b> Positions des fluxmètres radiatifs et totaux par rapport à l’extrémité de la parcelle (Letia Mars 2022).....	112

<b>Figure V-11.</b> Variation dans le temps des flux radiatifs et totaux reçus par les capteurs lors de l'expérience de Speluncatu (Mars 2021).....	113
<b>Figure V-12.</b> Champs de températures et lignes de courant obtenus numériquement quand le front de flammes atteint la fin de la parcelle.....	113
<b>Figure V-13.</b> Comparaison des flux radiatifs numériques (FireStar2D) et expérimentaux reçus par les capteurs lors de l'expérience de Speluncatu (Mars 2021) .....	114
<b>Figure V-14.</b> Flux expérimentaux radiatifs et totaux enregistrés par les différents fluxmètres au cours de l'expérience de Letia (Mars 2022).....	115
<b>Figure V-15.</b> Flux radiatifs et totaux évalués sur FireStar2D pour l'expérience de Letia (Mars 2022).....	115
<b>Figure V-16.</b> Variation dans le temps des flux numériques radiatifs et totaux évalués avec FireStar3D et reçus par les capteurs : (a) P1 ; (b) P2 (Letia Mars 2022).....	116
<b>Figure V-17.</b> Variation dans le temps des flux radiatifs expérimentaux et numériques (FireStar3D) reçus par les capteurs : (a) P1 ; (b) P2 (Letia Mars 2022) .....	117
<b>Figure V-18.</b> Estimation visuelle de l'angle d'inclinaison de la flamme (Letia Mars 2022)	118
<b>Figure V-19.</b> Estimation numérique de l'angle d'inclinaison de la flamme (Letia Mars 2022) .....	119
<b>Figure V-20.</b> Images IR capturées par des drones pendant la propagation des feux expérimentaux réalisés en : (a) Octobre 2021 ; (b) mars 2022 .....	120
<b>Figure V-21.</b> Variation dans le temps du front de pyrolyse sur la surface du combustible obtenu par FireStar3D pour différents types de maillages : (a) Speluncatu Octobre 2021 ; (b) Letia Mars 2022.....	122
<b>Figure V-22.</b> Différents types d'allumage appliqués sur FireStar3D sur la configuration de Letia (mars 2022) : (a) instantané ; (b) non-uniforme.....	123

<b>Figure V-23.</b> Variation dans le temps du front de pyrolyse sur la surface du lit de combustible obtenu par FireStar3D pour différents types d’allumage (expérience de Letia Mars 2021)..	124
<b>Figure V-24.</b> Variation dans le temps du taux de dégagement de chaleur durant l’expérience de Letia, évalué sur FireStar3D pour les différents types d’allumage .....	124
<b>Figure V-25.</b> Développement du front de flammes durant l’expérience de Letia, évalué sur FireStar3D pour un allumage non uniforme : (a) $dt_{allumage} = 10$ s : (b) $dt_{allumage} = 20$ s.....	125
<b>Figure VI-1.</b> Visite sur la commune de Sari-Solenzara avec les opérationnels .....	129
<b>Figure VI-2.</b> Localisation du site choisi sur la commune de Sari-Solenzara .....	131
<b>Figure VI-3.</b> Couvert végétal et emplacement de la cible sur le site choisi.....	131
<b>Figure VI-4.</b> Définition des paramètres géométriques de la flamme (convention « Byram ») .....	137
<b>Figure VI-5.</b> Définition des paramètres géométriques de la flamme utilisés dans le modèle de Balbi pour un feu se propageant sur un plan incliné .....	137
<b>Figure VI-6.</b> Définition des caractéristiques géométriques de la flamme (convention de « Thomas »).....	140
<b>Figure VI-7.</b> Profondeur du front du feu dans la direction du vent évalué avec FireStar3D à partir de la température des particules de la végétation ( $T_s > 600K$ ) .....	142
<b>Figure VI-8.</b> Champ de températures et des vitesses obtenu avec FireStar2D .....	143
<b>Figure VI-9.</b> Vue latérale du front de flammes (isotherme 1000K) obtenu avec FireStar3D	144
<b>Figure VI-10.</b> Vue du dessus du front de flammes sur la surface du couvert végétal obtenu avec FireStar3D .....	144
<b>Figure VI-11.</b> Vue 3D du front de flammes obtenu avec FireStar3D.....	144
<b>Figure VI-12.</b> Variation du ROS en fonction du vent à 10 m pour différents modèles .....	147
<b>Figure VI-13.</b> Variation du ROS en fonction de la pente du terrain pour les différents modèles physiques.....	147

<b>Figure VI-14.</b> Configuration de la cible " être humain adulte " par rapport à la position du front de flammes .....	154
<b>Figure VI-15.</b> Configuration de la cible "bâtiment" par rapport à la position du front de flammes .....	155
<b>Figure VI-16.</b> Champs de températures instantanées obtenus à l'aide de FireStar2D lorsque le front flammes atteint la fin de la végétation sur la parcelle .....	157
<b>Figure VI-17.</b> Évolution des flux de chaleur radiatifs, calculés avec FireStar2D, pour une personne située à des distances de 10, 20, 30, 40 et 50 m de l'extrémité de la parcelle.....	159
<b>Figure VI-18.</b> Flux de chaleur radiatifs et totaux maximaux reçus par le corps humain à différentes positions lorsque le feu atteint la fin de la parcelle de végétation .....	159
<b>Figure VI-19.</b> Flux de chaleur radiatifs reçus par chaque niveau du bâtiment en fonction de la distance séparant l'édifice du front de flammes.....	161
<b>Figure VI-20.</b> Flux de chaleur convectifs reçus par chaque niveau du bâtiment en fonction de la distance séparant l'édifice du front de flammes .....	162
<b>Figure VI-21.</b> Flux de chaleur totaux reçus par chaque niveau du bâtiment en fonction de la distance séparant l'édifice du front de flammes.....	162
<b>Figure VI-22.</b> Effet des facteurs d'entrées sur les flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus à 50 m du front de flammes par un être humain .....	166
<b>Figure VI-23.</b> Effet des facteurs d'entrées sur les flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus à 50 m du front de flammes par le niveau R0 d'un bâtiment.....	167
<b>Figure VI-24.</b> Effet des facteurs d'entrées sur les flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus à 50 m du front de flammes par le niveau R1 d'un bâtiment.....	167
<b>Figure VI-25.</b> Effet des facteurs d'entrées sur les flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus à 50 m du front de flammes par le niveau R2 d'un bâtiment.....	167

**Figure VI-26.** Effet des facteurs d'entrées sur les flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus à 50 m du front de flammes par le niveau R3 d'un bâtiment..... 168

**Figure VI-27.** Lettre d'information des partenaires de la défense des forêts contre les incendies (DFCI) pour les élus de la Corse ([https://goliat.universita.corsica/article.php?id\\_site=65&id\\_menu=0&id\\_rub=808&id\\_cat=0&id\\_art=4481&lang=fr#GTI%20%20novembre%202021](https://goliat.universita.corsica/article.php?id_site=65&id_menu=0&id_rub=808&id_cat=0&id_art=4481&lang=fr#GTI%20%20novembre%202021)) ..... 170

# Liste des tableaux

---

<b>Tableau I-1.</b> Valeurs seuils des superficies brûlées par des feux de différentes tailles .....	14
<b>Tableau III-1.</b> Résultats expérimentaux sur la caractérisation de la végétation et les conditions météorologiques et topographiques mesurées lors des expériences du terrain .....	92
<b>Tableau IV-1.</b> Dimensions du maillage des configurations numériques FireStar2D pour les trois expériences réalisées à l'échelle du terrain .....	95
<b>Tableau IV-2.</b> Dimensions des mailles des phases solides et gazeuses dans les configurations FireStar3D des deux expériences du terrain : Speluncatu Octobre 2021 et Letia Mars 2022..	96
<b>Tableau V-1.</b> Intervalle de temps lors de la propagation du feu entre deux piquets consécutifs. ....	102
<b>Tableau V-2.</b> Valeurs du ROS expérimental et numérique obtenues avec FireStar2D et 3D .....	103
<b>Tableau V-3.</b> Valeurs d'intensité expérimentale et numériques obtenues sur FireStar2D et 3D .....	110
<b>Tableau V-4.</b> Positions des capteurs de flux en haut de la parcelle sur les sites expérimentaux de Speluncatu (Mars 2021) et de Letia (Mars 2022).....	112
<b>Tableau V-5.</b> Ratios moyennés dans le temps des flux de chaleur radiatifs par rapport aux flux totaux évalués expérimentalement et avec FireStar2D (Speluncatu Mars 2021).....	114
<b>Tableau V-6.</b> Ratios moyennés dans le temps des flux de chaleur radiatifs par rapport aux flux totaux évalués expérimentalement et avec FireStar2D (Letia Mars 2022) .....	116
<b>Tableau V-7.</b> Valeurs de ROS obtenus sur FireStar3D pour différentes dimensions du maillage .....	122

<b>Tableau V-8.</b> Valeurs de ROS et intensité obtenus sur FireStar3D pour différents types d'allumage (expérience de Letia).....	125
<b>Tableau VI-1.</b> Modèle de végétation : principales propriétés des particules mortes du maquis corse ainsi que les caractéristiques des particules vivantes du combustible, mentionnées entre parenthèses .....	132
<b>Tableau VI-2.</b> Principales propriétés moyennes de la végétation homogène, conditions météorologiques et topographiques.....	133
<b>Tableau VI-3.</b> Modèles utilisés pour évaluer le ROS .....	134
<b>Tableau VI-4.</b> Valeurs de ROS et de l'intensité obtenues à l'aide des différentes approches .....	135
<b>Tableau VI-5.</b> Longueur et hauteur de la flamme, obtenues avec les différentes approches physiques.....	137
<b>Tableau VI-6.</b> Formules empiriques utilisées à l'échelle du terrain pour évaluer la longueur de la flamme et valeurs pour une intensité de Byram de 44,62 MW/m.....	138
<b>Tableau VI-7.</b> Inclinaison de la flamme, obtenue avec les différents modèles physiques ...	139
<b>Tableau VI-8.</b> Modèles empiriques de calcul de l'angle d'inclinaison de la flamme.....	140
<b>Tableau VI-9.</b> Inclinaison de la flamme déterminée avec les modèles empiriques pour une intensité IB de 44,62 MW/m.....	141
<b>Tableau VI-10.</b> Profondeur et temps de résidence de la flamme évalués avec les différents modèles physiques.....	143
<b>Tableau VI-11.</b> Variation du ROS après une augmentation ou une diminution de 20% de certains paramètres d'entrées des modèles physiques.....	145
<b>Tableau VI-12.</b> Changement dans la quantité de combustible jouant un rôle lors de la propagation du feu évaluée pour du Pin de Monterey (pinus radiata) et influence sur l'intensité de Byram (Mcarthur and Cheney 2015).....	148

<b>Tableau VI-13.</b> Évaluation de l'intensité de Byram à la suite d'épisodes pluvieux en utilisant les résultats du .....	149
<b>Tableau VI-14.</b> Valeurs des constantes de $hc_{ext}$ évaluées à l'aide du modèle de MOWITT .....	157
<b>Tableau VI-15.</b> Valeurs seuils de flux thermique pour différents types de cibles (Crocker and Napier 1986; Butler and Cohen 1998a; Casal Fàbrega <i>et al.</i> 1999; Lilley 2000) .....	158
<b>Tableau VI-16.</b> Coefficients de la formule à usage opérationnel (corps humain et bâtiment). $Q_{tot}$ exprimé en $kW/m^2$ et d en m. ....	165
<b>Tableau VI-17.</b> Paramètres utilisés pour de l'analyse de sensibilité globale .....	166

# Nomenclature

---

## *SYMBOLES UTILISES*

$A$	Facteur radiatif
$a_{lat}, a_{liv}, a_{up}$	Facteurs d'échelle intermédiaires
$a_M$	Paramètre du modèle de Balbi
$B$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )
$C_{pw}$	Capacité calorifique de l'eau (J/kg.K)
$C_{p0}, C_{pa}$	Capacité calorifique de l'air (J/kg. K)
$C_p$	Capacité calorifique du combustible (J/kg. K)
$C_D$	Coefficient de traînée des particules solides
$D$	Diamètre des particules solides (m)
$d_f$	Profondeur du front de flammes (m)
$e$	Épaisseur du combustible (m)
$f_v$	Fraction volumique des suies dans la phase gazeuse
$F_{Di}$	Force de traînée
$Fr$	Nombre de Froude
$g$	Accélération gravitationnelle ( $\text{m/s}^2$ )
$H$	Hauteur de la flamme (modèle de Balbi) (m)
$h$	Épaisseur du combustible (modèle de Balbi) (m)
$h_c$	Coefficient de transfert de chaleur convectif ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )
$h, h_\alpha$	Enthalpie de mélange gazeux et enthalpie d'une particule chimique $\alpha$
$h_f$	Hauteur de la flamme (m)

$I_B$	Intensité de Byram (W/m)
$I$	Intensité radiative (W/m <sup>2</sup> )
$J$	Irradiance totale (W/m <sup>2</sup> )
$k$	Énergie cinétique turbulente
$K$	Loi des forces de traînée
$K_l$	Coefficient de traînée (s/m)
$L$	Profondeur de la flamme (m)
$l$	Longueur de la flamme (m)
$m$	Teneur en eau du combustible (-)
$\dot{M}_\alpha$	Taux de production massique des particules chimiques $\alpha$ résultant de la dégradation de la végétation (kg/s)
$Nu$	Nombre de Nusselt
$P, P_\alpha$	Pression de mélange gazeux et pression partielle des particules chimiques $\alpha$ dans le mélange
$P_{th}, P_{hs}$	Pressions thermodynamique et hydrostatique du mélange gazeux
$Pr$	Nombre de Prandtl
$q$	Energie d'ignition (J/kg)
$\dot{Q}_S, \dot{Q}_{S,Char}, \dot{Q}_{S,Conv}$	Taux d'énergie reçu par les particules solides (total, suite à la combustion de combustible et par convection) (W)
$Q_{rad}, Q_{conv}, Q_{tot}$	Flux de chaleur radiatif, convectif et total reçu par une cible (W/m <sup>2</sup> )
$R_\alpha$	Constante des gaz parfaits d'une particule chimique $\alpha$
$Ra$	Nombre de Rayleigh
$Re$	Nombre de Reynolds
$RH$	Humidité relative (%)
$ROS$	Vitesse de propagation du feu (m/s)

$R$	Vitesse de propagation (modèle de Balbi) (m/s)
$R_b, R_r, R_c$	Contribution du rayonnement de la base de la flamme, du corps de la flamme et de la convection sur la propagation du feu (m/s)
$r_{00}$	Coefficient du modèle de Balbi
$S, S_t$	Surface foliaire morte et totale ( $m^2 / m^2$ )
$s$	Rapport surface / volume des particules de combustible ( $m^{-1}$ )
$s_G$	Coefficient d'absorption du mélange gaz/suies
$Sc$	Nombre de Schmidt
$T_a, T_s, T_i, T_{vap}, T$	Température ambiante, des particules solides, d'ignition, de vaporisation et température des gaz chauds (K)
$t$	Temps (s)
$u, v, w$	Vitesse des gaz (m/s)
$U$	Vitesse du vent (m/s)
$W_{vap}, W_{pyr}, W_{char}, W_{CO}, W_{suies}$	Taux de vaporisation de l'eau, de pyrolyse de la matière sèche, de combustion du produit carbonneux, du CO et des suies (kg/s)
$X, Y, Z$	Coordonnées spatiales (m)
$W_0$	Largeur de la ligne d'allumage (m)
$Y_{H2O}, Y_{Sec}, Y_{Char}, Y_{Cendre}$	Fraction massique de l'eau, du combustible sec, du charbon et de la cendre dans la phase solide
$Y_\alpha$	Fraction massique des particules chimiques dans la phase gazeuse
$\Delta H_c$	La chaleur de combustion (kJ/kg)
$\Delta h_{vap}, \Delta h_{pyr}, \Delta h_{char}, \Delta h_{CO}, \Delta h_{suies}$	Enthalpie de de l'eau, de pyrolyse, de combustion du produit carbonneux, du CO et des suies

### **LETTRES GRECQUES**

$\alpha$	Angle d'inclinaison du terrain ( $^{\circ}$ )
$\alpha_{SG}$	Fraction de la chaleur de combustion absorbée par les particules solides
$\beta$	Fraction volumique occupée par la strate végétale
$\beta_G$	Fraction volumique de la phase gazeuse
$\varepsilon$	Taux de dissipation turbulent
$\lambda$	Conductivité thermique du mélange gazeux (W/m.K)
$\gamma$	Angle d'inclinaison de la flamme ( $^{\circ}$ )
$\mu, \mu_T, \mu_e$	Viscosités dynamique, turbulente et effective du mélange gazeux (kg/m.s)
$\chi$	Fraction de l'énergie rayonnée (-)
$\Phi$	Flux rayonné (kW/m <sup>2</sup> )
$\varepsilon$	Émissivité
$\gamma$	Angle d'inclinaison de la flamme par rapport à la perpendiculaire au sol ( $^{\circ}$ )
$\rho, \rho_{sec}, \rho_s, \rho_{soot}$	Masse volumique de la phase gazeuse, de la matière sèche, de la phase solide et des suies (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	Charge surfacique (kg/m <sup>2</sup> )
$\delta$	Longueur d'extinction dans le couvert végétal (m)
$\tau$	Temps de résidence de la flamme (s)
$\tau_0$	Paramètre du temps de résidence de la flamme (75591 s/m)
$\tau_n$	Échelle de temps de Kolmogorov
$\Psi_0$	Masse mesurée pour une teneur en eau nulle (kg)
$\Psi_i$	Masse instantanée (kg)

$\nu_{O_2}^S, \nu_{O_2}^G, \nu_{O_2}^{Soot}$

Coefficients stœchiométriques de la masse du charbon, CO et  
combustion des suies

# Contexte général

---

Les feux de forêt sont considérés comme un risque majeur dans toutes les régions du globe. Plusieurs études montrent que ces incendies constituent une menace pour l'environnement, l'activité socio-économique et la sécurité des êtres vivants. Par exemple, selon une étude publiée en 2010 [1], 371 millions d'hectares d'espaces naturels (savanes, prairies, maquis, forêts...) ont brûlé chaque année en moyenne sur la période 1997-2008. 69% des surfaces parcourues par ces incendies (256 millions d'ha) sont situées en Afrique, 14,5% (54 millions d'ha) en Australie, 5,8% (22 millions d'ha) en Amérique du Sud et 4% (15 millions d'ha) en Asie Centrale. Les 24 millions d'hectares restants concernent pour l'essentiel les forêts boréales d'Amérique du Nord et d'Asie. L'Europe est également impactée à hauteur de 0,7 millions d'hectares par an en moyenne répartis principalement sur la péninsule Ibérique, l'Italie, la Grèce, le sud de la France. En 2018, les incendies de forêts ont détruit près de 178 000 hectares de forêts dans l'Union européenne [2], où 85% du total des surfaces brûlées sont dues à des incendies en France, Grèce, Italie, Portugal et Espagne [3]. En 2021, les feux de forêt de taille supérieure à 30 ha ont causé la destruction de près de 918 373 ha dans différents pays européens dont 500 566 ha dans l'Union Européenne, et aussi 195 091 ha environ au moyen orient et en Afrique du Nord [4]. En 2022, l'Union européenne a connu sa pire année en termes de superficie brûlée par les feux de forêt, avec plus de 785 000 ha, un record qui représente plus du double de la moyenne de 317 000 ha enregistrée entre 2006 et 2021 [5]. La Californie à son tour, a connu le deuxième plus vaste incendie de l'histoire du pays qui a parcouru plus de 110 000 ha en août 2021 [6]. En début de saison de feu au Canada en 2023, une situation sans

précédent s'est déclenchée suite à une période de sécheresse entraînant la destruction de plus de 2,7 millions d'hectares, soit huit fois plus que la moyenne des 30 dernières années [7].

La plupart de ces régions dont le risque incendie est particulièrement important, sont caractérisées par leur climat méditerranéen présent dans cinq régions du monde : le Bassin Méditerranéen (2 300 000 km<sup>2</sup>), la Californie aux États-Unis (324 000 km<sup>2</sup>), la zone centrale du Chili (140 000 km<sup>2</sup>), l'Afrique du Sud (90 000 km<sup>2</sup>) et l'Australie du Sud-Ouest (90 000 km<sup>2</sup>) [8]. Ce climat est dit tempéré et se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides [9], avec une variation de la température annuelle moyenne entre 14 et 20 °C, avec un minimum de 0 °C rarement atteint, et un maximum de 50 °C et où la présence des mers et des océans permet d'atténuer les températures élevées. Pendant les mois d'été, la sécheresse caractérise le climat méditerranéen, les précipitations deviennent rares voire inexistantes [10], et sont concentrées dans la période hivernale pouvant atteindre des valeurs annuelles comprises entre 250 à 1300 mm. Cependant, ces valeurs peuvent subir d'importantes variations suivant les années.

Le climat méditerranéen joue un rôle primordial dans l'organisation et le maintien des écosystèmes de ces régions du globe. En revanche, certaines conditions climatiques telles que les températures élevées et l'absence de précipitations, ainsi la dessiccation des végétaux, favorisent le départ et la propagation des feux. Le régime des vents varie d'une région à l'autre et facilite la propagation du front de flammes sous l'effet de vents parfois violents. Ainsi, les incendies progressent souvent très vite sous l'influence combinée du vent et de la sécheresse. Le contexte climatique est donc fortement propice aux feux de forêt dans ces régions, rendant ainsi le problème des incendies d'autant plus aigu que les conditions climatiques sont favorables à la propagation du feu [11]. Le problème majeur actuel dans les pays méditerranéens est l'augmentation de la fréquence des feux de forte intensité dans de nombreux endroits [12]. Cela est dû à deux raisons principales. D'une part, l'abandon de territoires suite à un exode rural

massif et, d'autre part, l'évolution des activités humaines qui deviennent principalement touristiques, entraînant une pénétration plus importante des individus dans des régions auparavant peu fréquentées. Il y a 10 000 ans, l'homme avait commencé à utiliser le feu comme un outil pour maintenir et aménager des zones de culture ou de pâture. L'abandon de certaines de ces pratiques traditionnelles semble être la cause de l'apparition de feux catastrophiques à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup> siècle [13]. De plus, les fluctuations climatiques qui donnent lieu à de longues périodes de sécheresse, augmentent aussi considérablement le risque incendie. Cependant, il est à noter que la cause principale des départs de feux est indéniablement corrélée à l'activité humaine [14]. C'est ainsi le cas des régions ayant une densité de population relativement importante comme les régions du bassin méditerranéen [15].

Plus que l'étendue des surfaces brûlées, ce qui doit être pris en compte c'est l'impact des feux sur les êtres vivants et les écosystèmes. En effet, des feux de forte intensité peuvent avoir des effets extrêmement négatifs sur les être humains, la faune, la flore et même sur le climat. Lors d'un grand feu, l'émission en grande quantité des gaz à effet de serre est avancée comme étant un facteur aggravant du changement climatique observé ces dernières années [16]. Par exemple, selon le programme européen sur le changement climatique Copernicus, le vendredi 12 août 2022, les émissions de dioxyde de carbone provoquées par les incendies en France avaient atteint leur record depuis le début des relevés en 2003. Selon les scientifiques de ce programme européen [17], les incendies de forêt qui ont touché l'Europe durant l'été 2022 auraient émis entre le 1<sup>er</sup> juin et le 31 août 6,4 mégatonnes de carbone, un niveau qui n'avait pas été atteint depuis 2007.

Le réchauffement climatique peut également rallonger la durée des saisons météorologiques des incendies et aussi rendre ces saisons longues plus fréquentes. Au niveau mondial, il est constaté une augmentation de la saison propice aux feux de forêt d'environ 78 jours par an [18].

Le changement climatique est une préoccupation croissante en tant que facteur augmentant l'intensité des feux, leur fréquence et leur distribution géographique à travers la surface de la planète. Les feux dits extrêmes sont de plus en plus fréquents dans des différentes régions du globe [19]. Bien que les feux de forêt jouent un rôle important, dans certains cas, pour le maintien des écosystèmes, des incendies avec des intensités élevées sont préjudiciables aux écosystèmes ainsi qu'au climat et peuvent causer des pertes humaines et économiques importantes. Ainsi, au cours des 10 dernières années, les feux extrêmes ont eu des conséquences environnementales considérables. La perte de vies humaines a malheureusement dû être déplorée et un montant de l'ordre de 100 milliards de dollars a été évalué pour les pertes économiques des pays impactés par ces phénomènes naturels [20]. Ces incendies extraordinaires semblent devenir la nouvelle norme, par l'augmentation de leur fréquence, leur ampleur et les grandes distances parcourues lors de leur propagation. En conséquence, prévoir le plus exactement possible le comportement de ces incendies est devenu indispensable pour mieux comprendre leur dynamique. Cette connaissance doit amener à l'amélioration des politiques de prévention et de lutte contre les ravages des feux de forêt.

La politique du projet « feux » de l'UMR CNRS Sciences Pour l'Environnement 6134 de l'Université de Corse Pasquale Paoli est de répondre aux besoins des opérationnels qui sont au service de la résolution des problématiques locales. Dans ce contexte, les tâches menées au cours de cette thèse au sein de ce projet, recouvrent des travaux théoriques, numériques et expérimentaux dans le but d'étudier les feux de forte puissance. Le principal objectif de cette thèse est de proposer une modélisation de ces feux en utilisant des différentes approches et de les analyser afin de sélectionner des modèles susceptibles d'être utilisés comme outils d'aide à la décision et d'aménagement du territoire par les services opérationnels.

# Chapitre I. Introduction

---

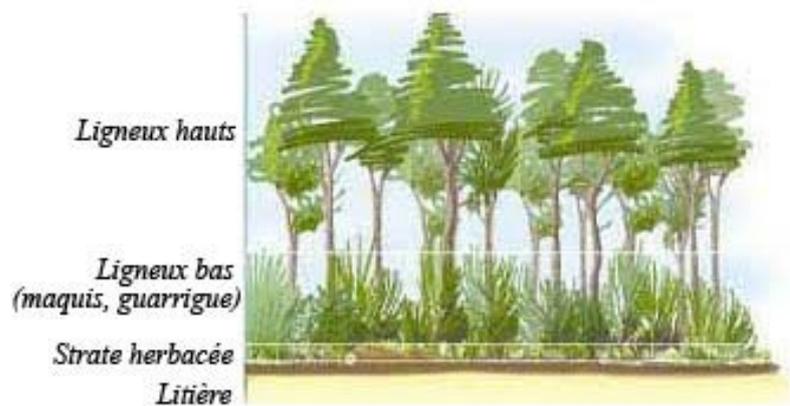
## I.1 Le couvert végétal dans les zones où règne un climat méditerranéen

Dans les zones caractérisées par le climat méditerranéen, les formations végétales naturelles sont très variées et dépendent de la disponibilité en eau qui varie fortement selon les endroits. Plus de 48 250 espèces de végétaux [21] et entre 45 000 et 60 000 espèces, en prenant en compte l’Afrique du sud [22], caractérisent ainsi ces régions du globe. Il s’avère donc très difficile de déterminer un type unique de couvert végétal dans ces régions car la diversité des couverts dépend de la variation de la topographie, de l’exposition à des régimes de vent, à l’altitude du site et à l’activité humaine.

Cependant, les différents écosystèmes présents peuvent être définis en trois catégories (figure I-1) selon le critère physiognomique [23]:

- Les forêts de Chêne vert qui se développent sur tous les substrats pourvus qu’ils soient relativement secs ainsi que les forêts de Chêne-liège sur sols siliceux et climat plus humide. Par exemple, les forêts de Pin d’Alep (*Pinus halepensis*) qui sont présents dans les zones les plus xériques.
- Les maquis qui sont des végétations composées essentiellement de ligneux bas qui ne dépassent pas 7 m de hauteur : *macchia* en Italie, *Chaparral* en Californie, *matorral* en Espagne et Chili, *renosterveld* en Afrique du Sud et *mallee* en Australie.
- La garrigue qui représente la végétation plus basse et moins dense que le maquis : *gariga* en Italie, *Coastal sage* en Californie, *phrygana* en Grèce, *mallee* en Australie, *jaral* au Chili et *Fynbos* utilisé en Afrique du Sud.

Il est à noter que ces types forestiers présentés sont spécifiques au bassin méditerranéen. Ces types se distinguent nettement de ceux rencontrés ailleurs dans le monde. Par exemple, l'Eucalyptus, en l'Australie, est une espèce qui a évolué pour s'adapter aux conditions spécifiques de ce continent, avec une résistance accrue à la sécheresse. Ces adaptations reflètent l'interaction complexe entre la flore et les conditions climatiques propres à chaque région.



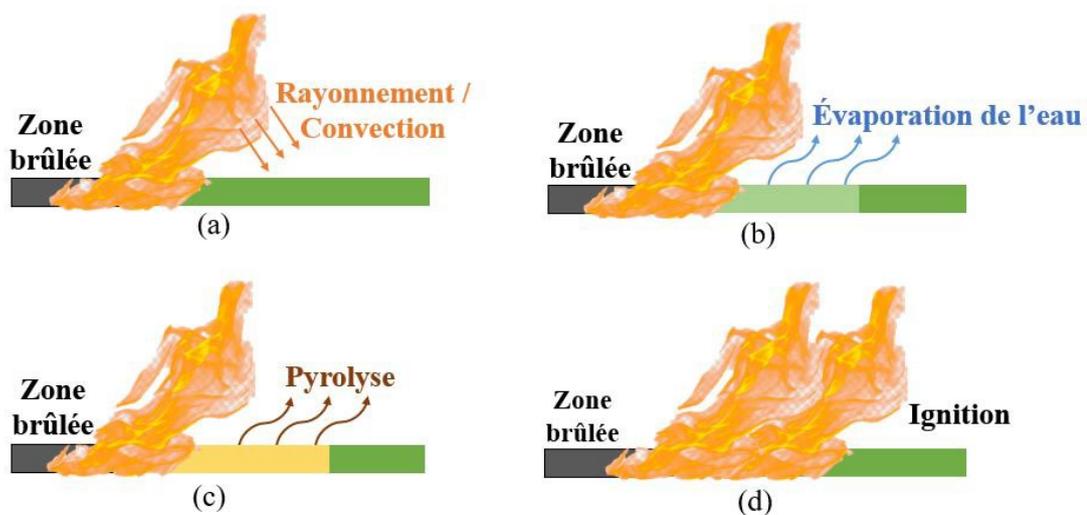
**Figure I-1.** *Différents écosystèmes du couvert végétal méditerranéen (Crédit : [https://www.animateur-nature.com/telechargements/pfci/PFCI\\_1\\_Mecanismes-du-feu.pdf](https://www.animateur-nature.com/telechargements/pfci/PFCI_1_Mecanismes-du-feu.pdf))*

## **I.2 Principe de propagation des feux de forêt**

Un feu de forêt est un phénomène complexe provoqué par les interactions d'un grand nombre de processus chimiques et physiques et provoquant une libération de chaleur due à la combustion de la végétation [24]. Ce sont donc ces mécanismes complexes couplés qui donnent lieu à un incendie, et entretiennent ensuite sa propagation. La propagation d'un feu peut se subdiviser en quatre phases successives : la phase de déshydratation, la phase de pyrolyse, la phase d'inflammation et de combustion et finalement l'extinction (figure I-2).

Nous allons essayer de décrire brièvement le mécanisme de propagation d'un incendie. Pour cela, nous allons considérer la végétation comme un milieu homogène équivalent. Nous allons ensuite considérer un volume de végétation non brûlé situé juste devant le feu. Ce volume est soumis à des transferts de chaleur provenant du feu. Durant la phase de pré-inflammation, le volume de la végétation absorbe une quantité de chaleur transmise par convection grâce aux

gaz chauds et par le rayonnement émis par le corps de la flamme ainsi que les braises. La température du combustible augmente alors jusqu'à 100 °C où l'eau s'évapore. Le combustible finit par se déshydrater complètement, tandis que sa température continue à augmenter. Lorsque la température des particules de la végétation atteint 400°C, une phase de dégradation (pyrolyse) se produit. C'est lors de cette étape qu'a lieu une réaction chimique libérant des gaz inflammables, du charbon et de l'énergie sous forme de chaleur. Ensuite, a lieu la phase d'inflammation durant laquelle une partie des gaz libérés se mélange avec l'oxygène de l'air. Lorsque le feu est suffisamment proche, la combustion commence, le mélange gazeux s'enflamme et le feu peut ainsi continuer à se propager. Le charbon qui s'oxyde à son tour émet du CO et du CO<sub>2</sub> et forme les braises. Avec l'apport d'une quantité suffisante d'oxygène, les braises continuent à se consumer pour former les cendres qui représentent la partie minérale du combustible. Pendant la combustion des produits de pyrolyse, l'énergie libérée continue à échauffer les gaz chauds jusqu'à une température supérieure à 1200 K. Ayant une densité inférieure par rapport à celle de l'air, ces derniers suivent un mouvement ascendant dû à la force de flottabilité, dont la partie visible de ces gaz constitue la flamme. L'extinction aura lieu lorsque la totalité du combustible végétal sera consommé.



**Figure I-2.** Différentes étapes de la propagation du feu : (a) réchauffement du combustible ; (b) évaporation de l'eau contenue dans le combustible ; (c) étape de pyrolyse ; (d) étape de combustion

### I.3 Facteurs qui influent sur la propagation du feu

Il existe plusieurs facteurs qui jouent un rôle important sur le comportement d'un feu de forêt dans ses différentes phases de propagation. Ces facteurs sont articulés autour d'un « triangle de feu », dont les trois côtés sont : le combustible, la météorologie et la topographie (figure I-3) [25].



**Figure I-3.** Triangle du feu appliqué à l'échelle des feux de végétation

Le domaine de propagation du feu est un milieu poreux composé d'une phase gazeuse et d'une phase solide [26]. Il est donc constitué d'un ensemble de particules solides réparties dans l'air ambiant. Les différentes caractéristiques physico-chimiques de la végétation jouent un rôle primordial dans la dynamique du feu. Par exemple, nous pouvons citer le rapport surface / volume qui influence les échanges thermiques entre les particules du combustible et les gaz, estimant la surface de contact entre les deux [27,28], ou bien la teneur en eau du combustible qui varie en fonction du temps et des conditions météorologiques et qui dépend de la structure physique du combustible [29]. De nombreuses études évoquent une corrélation directe entre la teneur en eau du combustible et son taux d'inflammabilité [30–32]. Étant un indice d'évaluation de l'intensité des feux et des surfaces brûlées [33,34], cette grandeur permet alors d'estimer le risque incendie. D'autres caractéristiques comme la charge surfacique et la continuité du couvert végétal impactent aussi grandement la dynamique d'un incendie. Un feu de forêt est d'autant plus puissant que la charge du combustible est importante [14]. Ainsi, la réduction de

la biomasse sur un territoire donné permet de réduire le risque incendie en utilisant différentes techniques [35–37]. Une technique communément utilisée est celle des brûlages dirigés lors de l'aménagement du territoire dans le plan de prévention des risques [38].

De plus, nous pouvons distinguer trois types de feux de forêt qui sont liés aux types du couvert végétal du territoire :

- (1) Les feux de sol (figure I-4) qui brûlent la matière organique contenue dans la litière, l'humus ou les tourbières, et d'autres végétaux morts qui deviennent assez secs. Ces feux se propagent lentement et souvent sans flammes. Toutefois, ce type de feu est très destructeur car il peut couvrir très longtemps en profondeur, ce qui rend plus difficile son extinction définitive.



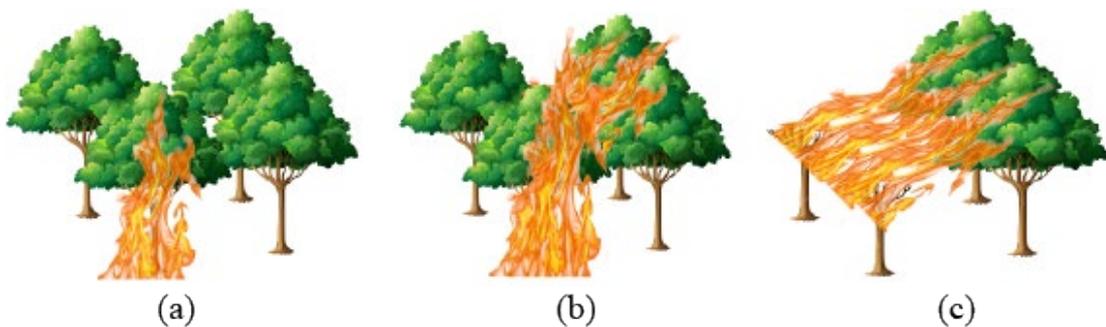
**Figure I-4.** Représentation d'un feu de sol (crédit : "alpes-maritimes.gouv.fr")

- (2) Les feux de surface (figure I-5) qui brûlent la partie basse de la végétation comprenant la strate herbacée, les ligneux bas, les maquis et les arbres de petite taille. La vitesse de ce type de feu dépend de certaines conditions, et au moment où elles sont favorables à la propagation, l'incendie peut se propager rapidement au niveau du sol sur de la végétation morte (feuilles mortes, branches) ou vivante (arbustes, feuilles).



**Figure I-5.** Représentation d'un feu de surface (crédit : "alpes-maritimes.gouv.fr")

(3) Les feux de cimes qui se propagent à travers des strates de taille et de densité importantes. Ce type de feu libère de grandes quantités d'énergie et se caractérise par des longueurs de flammes et des vitesses de propagation élevées. Selon [39] on peut distinguer trois types de feux de cimes. En effet, un feu de cimes peut être indépendant du feu qui se propage dans la strate basse de la zone considérée, ou bien il sera la conséquence d'un feu de surface. Ce dernier peut être un feu passif ayant la même vitesse du feu de surface ou actif ayant une vitesse plus élevée où le feu se propage d'arbre en arbre (figure I-6). Ces trois types de feux peuvent se produire en même temps dans une zone considérée.



**Figure I-6.** Différents types des feux de cimes (selon [39]) : (a) passif ; (b) actif ; (c) Indépendant

Un feu de forêt est aussi piloté par la topographie qui regroupe plusieurs facteurs comme l'altitude, l'exposition solaire, le climat et la pente [40]. Les premiers facteurs peuvent avoir des conséquences indirectes sur la propagation des feux en exerçant une influence sur les caractéristiques de la végétation et la teneur en eau du combustible. Cependant, la pente du

terrain possède un effet immédiat sur le comportement du feu [40]. Des études numériques et des expériences à différentes échelles ont été menées pour étudier l'effet de la pente sur la propagation des incendies [41–44]. La présence de la pente favorise les transferts de chaleurs entre le front de flammes et la végétation. D'après Dupuy et Maréchal [41], il existe une valeur seuil de la pente du terrain ( $20^\circ$ ) au-delà de laquelle la convection est le mode de transfert de chaleur dominant. Autrement dit, entre  $0^\circ$  et  $20^\circ$ , c'est le rayonnement qui est dominant.

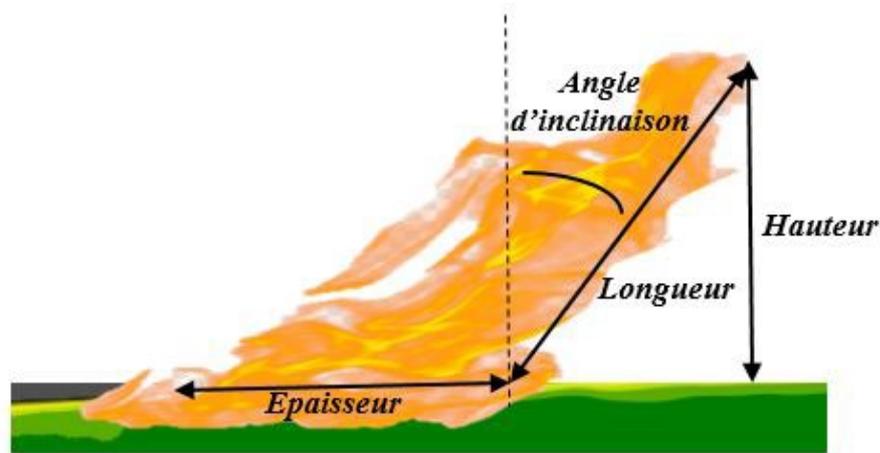
Les conditions météorologiques influent également sur la propagation d'un feu. La température de l'air, l'humidité, le profil du vent, sont tous des facteurs qui peuvent changer au cours du temps et aussi pendant une même journée, et peuvent aussi affecter les caractéristiques de la végétation. En effet, il existe une corrélation entre les précipitations et la teneur en eau du combustible et donc avec son inflammabilité, ce qui permet de modifier l'activité des feux de forêt [45].

Le vent est un paramètre qui influence fortement la propagation du feu. Ce dernier, affecte la consommation du combustible liée à la quantité d'oxygène apportée par le vent vers la zone de brûlage. En plus, pendant un régime de vent fort, les flammes deviennent plus penchées vers la zone non brûlée, ce qui augmente le transfert de chaleur convectif et radiatif entre le front de flammes et le combustible [46]. Ainsi, de nombreuses études ont constaté que le transfert de chaleur convectif joue un rôle important dans la propagation en présence du vent [47–49].

## **I.4 Les caractéristiques principales d'un feu de forêt**

La propagation du feu peut être caractérisée par plusieurs paramètres géométriques qui décrivent le front de flammes. Les principaux sont : la hauteur, la longueur, l'épaisseur et l'inclinaison de la flamme. Selon [50], la hauteur de la flamme est mesurée à partir du sommet de la flamme jusqu'à sa projection orthogonale sur la surface supérieure du couvert végétal. Selon [51], la manière la plus communément employée pour la longueur de la flamme

correspond à la distance entre le sommet visible de la flamme et la base du front de feu qui délimite la zone brûlée et non brûlée de la végétation. L'épaisseur ou la profondeur du front de flammes représente la distance entre l'avant et l'arrière du front. L'angle d'inclinaison de la flamme traduit le fait que la flamme se penche vers le sol lors de la propagation du feu sous l'effet du vent et de la pente. C'est l'angle compris entre la verticale au sol et la flamme (Figure I-7). Il est à noter que d'autres définitions de ces grandeurs géométriques existent dans la littérature et demandent donc d'être vigilant lorsque des données expérimentales ou numériques sont comparées. Les différentes approches d'évaluation de la géométrie de la flamme vont être présentées dans le dernier chapitre du manuscrit.



**Figure I-7.** Représentation schématique des différentes caractéristiques d'une flamme

En plus de ces caractéristiques géométriques, d'autres grandeurs sont également utilisées pour caractériser le comportement d'un incendie. C'est essentiellement la vitesse de propagation (ROS<sup>1</sup>) et l'intensité du feu. La vitesse de propagation ROS est un paramètre essentiel dans la description du comportement d'un feu à l'échelle du terrain car il permet ensuite d'avoir une idée approximative de son intensité. C'est une grandeur moyenne qui définit la distance parcourue par le feu pendant un temps donné.

---

<sup>1</sup>Le terme Rate of spread (ROS) est communément utilisé par la communauté scientifique

L'énergie dégagée par un feu par unité de temps définit l'intensité du feu [42,46,52]. Cette intensité peut être calculée selon différentes méthodes. Selon [46], elle est égale au produit de la chaleur de combustion de la végétation (kJ/kg), de la quantité de combustible consommée au niveau du front de flammes (kg/m<sup>2</sup>), et de la vitesse de propagation linéaire du feu (m/s). D'autres méthodes sont liées à l'estimation indirecte de l'intensité de Byram en se basant sur les observations de la longueur ou la hauteur de la flamme [53]. Des efforts ont été aussi déployés pour utiliser l'imagerie de détection à distance infrarouge afin d'estimer cette grandeur [54]. D'autres méthodes de calcul employées en modélisation, notamment dans les modèles physiques complets FireStar 2D et 3D [55–59], vont être présentées dans les sections suivantes. Cette grandeur dénommée « *Fireline intensity* » est communément utilisée par les opérationnels et les scientifiques afin de comparer les feux selon des classes de sévérité [60] ou suivant des catégories liées à cette grandeur : feux de faible puissance, modéré, forte ou très forte puissance [61].

## **I.5 Les feux hors-normes**

### **I.5.1 Contexte général**

Depuis les années 1950, l'idée d'un feu de type « *blow-up* » a été présentée par Byram pour décrire une transition brusque d'un feu de surface de faible intensité à un feu de forte puissance se propageant dans la canopée des arbres [62]. Ce dernier utilise des termes comme « exploser », « conflagration » et « erratique » pour décrire le comportement inhabituel d'un feu de forte puissance. Selon Byram, les feux de forêt susceptibles de présenter ces caractéristiques peuvent être de tailles différentes. Il existe de nombreux termes dans la littérature décrivant ces événements, sans qu'il y ait d'accord sur la terminologie et la méthodologie utilisées dans la description de ces phénomènes [63]. Le manque d'harmonisation actuelle dans les termes utilisés est un obstacle à une bonne communication entre les personnes en charge de la prévention et de la lutte contre les incendies, la communauté des chercheurs et

les décideurs. Cette harmonisation est cependant souhaitable car la caractérisation précise de la nature d'un phénomène a une répercussion immédiate sur les décisions prises, donc les solutions à envisager pour minimiser les dommages de ce dernier [64].

Selon Tedim *et al.* [65], il est possible de trouver dans la littérature une classification de ces feux dits « extraordinaires » suivant leurs tailles : grands [66–68], très grands [69,70], et extrêmement grands [71]. Ainsi, ces trois classes caractérisent les incendies en fonction des valeurs seuils de surface brûlée lors de leur propagation, où ces valeurs sont rarement congruentes. La plupart des définitions sont basées sur des quantités absolues qui peuvent évoluer au cours du temps et en fonction de la géographie de référence [72]. Par exemple, en Europe, la valeur seuil qui correspond à un grand feu varie entre des superficies supérieures à 100 ha [73,74] ou supérieures à 1000 ha [75]. Dans d'autres régions du monde, cette valeur peut varier entre un seuil minimum supérieur à 20 ha en Arizona (États Unis) [76], ou à 1000 ha en Australie [77], 4950 ha au Boreal Shield écozone de l'Ontario [78] et 40 000 ha à l'Ouest des États-Unis [79]. La valeur seuil qui décrit les très grands feux varie de plus de 1000 ha [80] jusqu'à plus de 20 234 ha [81], ou encore entre 5000 ha et 20 000 ha [70] [82]. Concernant les feux extrêmement grands, c'est un terme qui n'est pas largement utilisé, où Fernandes *et al.* [83] considèrent qu'un seuil minimum de 2500 ha constitue un feu extrêmement grand, ce qui est équivalent à 99,9<sup>ème</sup> percentile de la taille des incendies au Portugal (1998-2013). Le tableau (I-1) résume les valeurs seuils des superficies brûlées par les feux de tailles différentes (grand, très grand, extrêmement grand) présents dans le texte.

**Tableau I-1.** Valeurs seuils des superficies brûlées par des feux de différentes tailles

<b>Taille du feu</b>	<b>Valeur Seuil de la Superficie brûlée (ha)</b>
Grand	≥ 100 (Europe); ≥ 1000 (Australie); ≥ 4950 (Ontario); ≥ 40 000 (l'Ouest des États-Unis) ; > 41 020 (l'Est de l'Australie) ; > 100 000 (le Nord de l'Australie)
Très grand	> 1000 (Grèce) ; > 20 234 (États-Unis); entre 5000 et 20 0000 (États-Unis contigus et L'Ouest des États-Unis)
Extrêmement grand	2500 (Portugal)

Le terme « grands incendies peu fréquents », est également proposé par Meyn *et al.* [84] pour désigner des événements exceptionnels par la superficie brûlée par rapport aux incendies qui affectent habituellement les écosystèmes d'un territoire donné.

Il existe une autre méthode de classification qui est basée sur les opérations de suppression et qui prend en compte les étapes et la complexité des techniques utilisées [85]. Ainsi, les grands et très grands feux nécessitent la gestion et la supervision d'une équipe dédiée à la gestion de l'incendie. On peut citer l'exemple de l'IMT (Incident Management Team), une équipe de gestion des incidents qui est un groupe de personnes formées pour répondre à une situation d'urgence aux États-Unis d'Amérique, et qui réagit en fonction de la taille, de l'étendue et de la complexité de l'événement. Par contre, les très grands feux sont considérés difficiles à contrôler et susceptibles de causer des dommages importants.

Le terme de méga-feux, lui, est utilisé pour décrire les incendies qui se déroulent dans les écosystèmes forestiers [86], dans les zones sauvages et aux interfaces forêt-habitat (WUI<sup>2</sup>) [87]. Ce terme, de plus en plus utilisé par les médias, regroupe les feux parcourant des superficies importantes. Cependant, Williams et Hyde [86] suggèrent que la taille ne peut pas être le seul critère pour classer un incendie comme étant un méga-feu. Selon Liu *et al.* [88], les méga-feux se caractérisent par une intensité élevée et ils mettent en danger la santé et même la vie des populations, et ont des conséquences environnementales à l'échelle régionale, voire mondiale. Ces incendies sont hors-contrôle des moyens terrestre et aériens jusqu'à ce qu'un changement majeur des conditions météorologiques ou du combustible se produise.

Un autre terme pour caractériser un feu exceptionnel est le terme feux extrêmes. Même si cette caractérisation reprend celle des méga-feux, elle est plus liée au comportement du feu et à son environnement qu'à la surface brûlée. Par exemple, ont été considérés comme feux extrêmes, les feux qui se sont déroulés en Italie durant l'été 2017 dont la taille était pourtant

---

<sup>2</sup> Wildland Urban Interface

relativement limitée (moins de 5000 ha brûlés) mais qui ont duré plus de 10 jours sans pouvoir être fixés. Certaines approches considèrent un feu extrême comme un événement qui peut être dû à la jonction de plusieurs fronts de flammes de haute intensité [89]. D'autres approches interprètent les feux extrêmes comme des incendies individuels. Par exemple, dans une étude qui a été réalisée pour identifier les feux extrêmes au cours de la période 1984-2009 sur une zone de 91,2106 ha dans le nord-ouest des États-Unis, seuls les incendies individuels ont été pris en considération [90]. Dans cette étude, l'identification des feux extrêmes était basée sur la combinaison de plusieurs paramètres : la valeur seuil de la superficie brûlée (41 629 ha, 13 157 ha et 6 968 ha qui représentent les 99<sup>ème</sup>, 95<sup>ème</sup> et 90<sup>ème</sup> percentiles respectifs des feux individuels de tailles entre 0.18 ha et 229 622 ha), la possibilité d'endommager les WUI, la durée du brûlage et la sévérité. Une autre étude a été réalisée sur une zone géographique de 31 massifs de pins situés dans des différents pays en Europe (France, Italie, Allemagne) afin d'analyser les feux extrêmes qui avaient eu lieu entre les années 2000 et 2009 [91]. La sélection des feux extrêmes était basée sur la surface brûlée, où 255 feux se sont produits avec une superficie totale supérieure à 105 ha, cette valeur seuil qui représente le 99<sup>ème</sup> percentile des feux de tailles supérieures à 0.01 ha. Ces études montrent donc que certaines approches de classification des feux extrêmes se concentrent sur ces événements en tant que résultats classés en fonction de leur taille ou de leur impact. En revanche, la plupart des critères qui ont été utilisées pour classer un feu de forêt comme étant extrême sont liés au comportement et à l'environnement du feu. Selon Mc Rae *et al.* [68], le comportement d'un feu extrême est associé à un niveau d'énergie plus élevé, de chaos, ainsi qu'à l'interaction entre le feu et son environnement qui peut engendrer une accélération exponentielle de la vitesse de propagation d'un feu. Selon Tedim *et al.* [65], le terme « extrême » est le plus approprié et couramment utilisé dans les communautés des opérationnels et scientifique, car il prend en compte le danger ainsi que le risque incendie, le comportement et le régime des feux, et également leurs sévérités.

Cette définition se concentre sur les caractéristiques physiques du comportement d'un feu qui influencent la capacité de contrôle, étant donné que la dynamique peut être évaluée d'une manière cohérente dans tous les contextes. Ces paramètres physiques regroupent l'intensité du front de flammes, le ROS, les brandons du feu (« sautes » de feu), et le changement brusque lors de la propagation des feux.

## **I.5.2 Les types de feux extrêmes**

On distingue quatre types des feux extrêmes [65,92,93] :

### ***I.5.2.1 Les feux éruptifs***

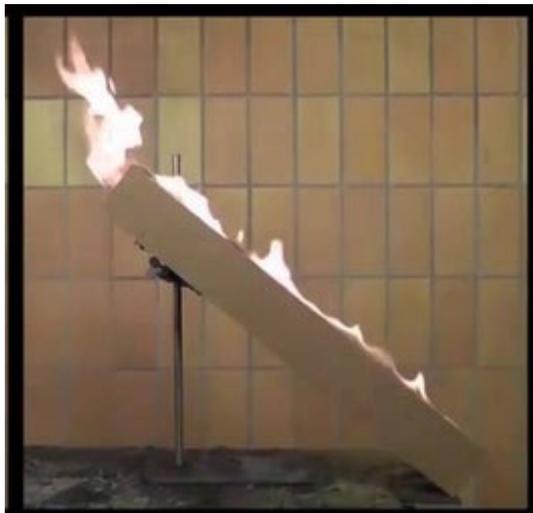
Cette désignation a été initialement proposée par le Pr. Viegas [94,95] puis réexaminée par ses soins et le Pr. Simeoni [93] dans le but de décrire les feux de forêt qui passent brusquement d'un comportement normal caractérisé par une vitesse de propagation relativement faible à une propagation hors-norme possédant une vitesse et un dégagement de chaleur beaucoup plus élevés sans qu'il y ait eu de changement environnemental majeur [35,96]. Ce phénomène est connu dans la littérature sous le nom d'explosion « *blow-up* » ou d'embrasement « *flare-up* » d'un incendie. La littérature rapporte qu'une dizaine de feux éruptifs ont marqué l'histoire des feux de forêt. Parmi eux, figurent les feux de Mann Gulch et Loop aux États-Unis qui ont causé la mort d'environ 26 personnes, celui de Palasca en France où 2 opérationnels ont périés et le feu de Kornati en Croatie où 11 victimes ont trouvé la mort [97–100].

Comme il a été remarqué que ce type d'incendies se propageait sur des terrains avec une forte pente, notamment dans des canyons, des expériences à l'échelle du laboratoire ont été menées par le Pr. Viegas en 2005 [43,94]. Le but était d'étudier les conditions de déclenchement de tels feux liés à la valeur de l'angle de la pente et en prenant en compte les propriétés du combustible et les conditions initiales de propagation. Selon le Pr. Viegas [94], le comportement éruptif d'un feu est associé à l'interaction entre le front de flammes et le flux d'air induit par ce

même front. Ce dernier permet un apport supplémentaire d'oxygène dans la zone de réaction. Cela permet ainsi d'améliorer la combustion, entraînant une augmentation des longueurs de flammes et de la vitesse de propagation de l'incendie. Cette quantité d'air induite a été mise en évidence expérimentalement à l'échelle du laboratoire par Viegas et Pita en 2004 [43]. À l'aide d'une plaque métallique placée en bas du canyon, l'aspiration de l'air a pu être empêchée. L'expérience a ainsi montré que sans cet apport d'air supplémentaire, le phénomène d'éruption ne se produisait pas. Ce phénomène de vent induit avait également été observé à l'échelle du terrain lors d'expériences menées à Gestosa au Portugal en 2002 [101]. Lors de ces expériences, des mesures du vent à l'intérieur du canyon avaient montré qu'il était beaucoup plus important que le vent extérieur.

D'autres hypothèses ont été attribués au déclenchement de ce phénomène d'éruption. Par exemple, Dold et Zinoviev, Sharples *et al.* [102,103] ont avancé l'hypothèse que l'éruption était liée à l'attachement du front de flammes sur la surface d'un terrain incliné. Simcox *et al.* [104] ont conclu que l'attachement de la flamme est le résultat de deux effets distincts : un effet de cheminée (Venturi) important causé par la source de chaleur, et l'effet Coandă (effet dû à un gradient de pression causé par les différentes capacités d'aspiration de l'air, en amont et en aval du feu se propageant sur le terrain en pente [103]). Cet attachement contribue à l'augmentation des échanges du flux convectif avec la zone de végétation non brûlée entraînant une accélération de la vitesse de propagation. Des études expérimentales et des observations de feux réels, permettent d'étayer cette théorie et montrent la corrélation entre l'attachement du front de flammes et l'apparition d'un feu éruptif. [103,105] ont utilisé cette hypothèse et ont constaté que dans une configuration ressemblant à une tranchée (figure I-8), la présence d'une pente suffisamment inclinée avec l'inhibition de l'entraînement latéral de l'air dans le panache, provoquent plus facilement l'éruption. Ces études ont pour origine l'accident causé par le feu de King's Cross Station à Londres qui avait eu lieu en Novembre 1987 sur un escalator en bois

formant une tranchée, où le feu a augmenté de taille d'une façon spectaculaire et qui a causé la mort de 31 victimes [103].



**Figure I-8.** Représentation d'un feu de tranchée (<https://youtu.be/PSmeg-vn6ho>)

Une autre hypothèse concernant l'accumulation des COV (composés organiques volatils), a été liée au phénomène de l'éruption. L'émission des COV est normalement due au réchauffement de la strate végétale par la chaleur émise par le feu. En été, en n'ayant pas suffisamment d'eau dans le sol, à l'approche du front de flammes, la végétation libère plus des COV afin de se rafraîchir [106]. Ces produits peuvent ainsi créer un mélange inflammable qui, selon cette théorie, peut engendrer le phénomène d'éruption. Cette explication est très populaire parmi les pompiers qui, suivant leur expertise pratique, associent parfois la forte odeur des COV dans la végétation à la transition très rapide dans la propagation du feu, en particulier lorsque la configuration du terrain est confinée (canyon). Par exemple, cette hypothèse a été avancée pour expliquer l'accident de Palasca en Balagne (Corsica) en l'an 2000, où un feu éruptif a causé la mort de deux pompiers, en suggérant la possibilité d'une accumulation d'un mélange de gaz dans les canyons [99]. Pour l'incendie qui avait eu lieu à Kornati (Croatia) en 2007 [99], une analyse de cet accident a suggéré que la cause de l'éruption était due à un mélange homogène de gaz dégagé par la propagation du feu dans des herbes pendant une longue durée et un vent qui avait emporté ces gaz vers un canyon où ils s'étaient accumulés à de fortes

concentrations. Lorsque le front de flammes a atteint ce mélange, il s'est enflammé et les pompiers ont d'abord été exposés aux gaz chauds, puis aux flammes provenant de la végétation brûlée. Durant ce feu, douze pompiers, professionnels et volontaires, ont perdu la vie et un autre a été gravement blessé dans un petit canyon. Le questionnement scientifique soulevé par ces hypothèses est la possibilité d'atteindre des concentrations suffisamment élevées de ces produits inflammables pour déclencher effectivement un feu éruptif. C'est ce dernier point qui a amené les chercheurs Butler *et al.* [107] à réfuter cette hypothèse. Ils ont ainsi mentionné que cela paraissait peu probable d'avoir une telle accumulation de gaz avec des concentrations élevées pour des feux de forêt. Donc cela ne pouvait pas aboutir à la création d'une explosion et donc au déclenchement de l'éruption.

#### ***1.5.2.2 Les sautes de feu***

Lors d'un feu de forte puissance et pour certains combustibles, il peut se produire un phénomène de projection des braises ou de particules incandescentes appelées brandons qui engendrent l'ignition du combustible à l'endroit où elles atterrissent à des distances parfois importantes du front de flammes. Dès 1959, Byram [46] a considéré ce type de feu comme étant le pire comportement qu'un incendie puisse avoir du point de vue de la lutte. La projection des brandons à l'extérieur du périmètre du feu principal augmente considérablement la difficulté pour contrôler l'incendie. Les brandons projetés sont susceptibles de menacer des infrastructures ou engendrer de nouveaux fronts de flammes devant le front principal, si les brandons sont en grande quantité [99]. Par exemple, lors des incendies produits en Australie le 7 février 2009, les brandons projetés ont facilité la propagation du feu d'une crête à une autre suivant le relief, et ont permis à l'incendie de traverser les zones dépourvues de végétation. Il a été relevé que les brandons avaient été projetés à des distances proches (0-200 m), moyennes (200-1000 m) et même importantes (22 km) du feu principal [108]. Selon Butler *et al.* [97,107] l'accumulation des brandons à des distances proches ou élevées du feu principal, permet

d'augmenter sensiblement la vitesse de propagation moyenne du front de flammes. Cheney and Bary estiment que la vitesse d'un feu avec projections de brandons est 3 à 5 plus élevée que celle d'un feu qui ne générerait pas de sautes de feu [109]. C'est la raison principale pour laquelle ce phénomène est considéré comme un feu extrême.

### ***1.5.2.3 Les tourbillons de feu***

Les tourbillons de feu sont des colonnes de gaz orientées verticalement et en rotation que l'on trouve dans ou à proximité des incendies (figure I-9) [92]. Ils ont été observés lors de feux de forêt, dans des zones urbaines et lors d'éruptions volcaniques en raison de la présence de flammes, de fumée, de cendres ou d'autres débris. Tous les tourbillons de feu en particulier les plus gros, représentent un danger considérable pour la sécurité des personnes en charge de la lutte en raison de l'augmentation de l'intensité du feu, la possibilité de projection de brandons, de la vitesse de propagation erratique et des dommages causés par le vent [110]. Plusieurs tourbillons de feu extrêmement importants ont été signalés lors d'incendies urbains ayant occasionnés d'importants dommages et pertes humaines. Ce fut le cas pour le terrible incendie de Tokyo en 1921 qui a engendré un tourbillon de feu extrêmement important et qui a tué environ 38 000 personnes en moins de 15 minutes [111]. Des tourbillons de feu se produisent également lors des feux de végétation. Selon Pirsko *et al.* [112], beaucoup de tourbillons se forment sur les pentes sous le vent. Cependant, de grands tourbillons de feu ont également été observés sur un terrain plat ou bien lors des brûlages dirigés [113]. Plusieurs facteurs interagissent de manières complexes et influencent la formation des tornades de feu. Ils sont ainsi difficilement prévisibles, ce qui peut expliquer les nombreux accidents reportés par les opérationnels dans le passé lors de tels évènements [110].



**Figure I-9.** *Un tourbillon de feu à Chillicothe, Missouri (États-Unis). (Photograph: Janae Copelin/Barcroft US)*

#### **I.5.2.4 Les feux de forte puissance**

Un feu de forte puissance est caractérisé par des flammes longues et profondes qui génèrent de la chaleur, des gaz et des particules, avec un panache ayant un mouvement ascendant [65]. La fumée et les vapeurs toxiques dégagées par ces feux rendent les moyens de lutte plus difficiles. Ils sont donc responsables de problèmes de santé à court et à long terme pour la population ainsi que pour les opérationnels en phase de lutte, [114] et même de décès qui peuvent survenir pendant et après l'événement. Les longues flammes représentent une menace pour les pompiers qui doivent opérer en s'approchant du front de feu tout en essayant de respecter une zone de sécurité [115]. Cette zone étant utilisée pour établir des coupures de combustible afin de réduire la propagation d'un feu de forêt ou de fournir des conditions de sécurité aux pompiers pendant les opérations de lutte contre les incendies [116,117]. Une intensité du front de flammes de 10 000 kW/m, représente une valeur limite pour contrôler un incendie [118,119]. En effet, au-delà de ce seuil, il est admis que même les moyens aériens sont inefficaces [120]. Donc, au-dessus de 10 000 kW/m, il n'est actuellement pas possible de maîtriser un incendie avec la technologie et les ressources dont disposent les opérationnels. Plus l'intensité du front de flammes est élevée et plus la quantité d'eau nécessaire pour le contenir augmente. Cette quantité est estimée à plusieurs litres, voire à des dizaines de litres par mètre

du front de flammes. Par exemple, pour une intensité de l'ordre de 10 000 kW/m, cette quantité est évaluée à 25 ou 30 litres toutes les 30 secondes par mètre linéaire du front de flammes [121].

L'intensité du front de flammes représente un paramètre fondamental dans le domaine des feux de forêt puisqu'elle est utilisée par les opérationnels pour déterminer leur capacité de contrôle de l'incendie. Plusieurs règles ont été développées pour associer ce paramètre à l'efficacité de la lutte contre les incendies [119]. Ces règles ont permis d'établir une classification des feux de forêt selon les techniques d'intervention et la difficulté de suppression [119,122,123]. Des catégories ont été parfois liées à un type particulier de combustible comme par exemple le pin gris ou tordu (« Mature Jack ou Lodgepole Pine »), forêts de sapin et de lichen [122,124] ou même les forêts d'eucalyptus en Australie [61]. Par exemple, pour ce dernier combustible, une valeur d'intensité supérieure à 7 MW/m correspond à un feu de cimes de très forte puissance, avec des longueurs de flammes qui peuvent dépasser les 15 m [61].

D'autres critères de classification sont basés sur des observations de différents feux et la mesure en temps réel des paramètres qui caractérisent leurs comportements. En se basant sur la littérature [124], Tedim *et al.* [65] ont défini des catégories pour une grande variété de combustibles (herbes, arbustes, forêts). Ce classement est basé sur des valeurs seuils de l'intensité du front liée à la longueur de la flamme et à la vitesse de propagation, ainsi que sur des observations spécifiques comme la probabilité de sautes de feu. Des interprétations sur les conditions d'intervention et la capacité des opérationnels à lutter efficacement contre des feux se propageant dans de forêts (pins, sapin et lichen), avec la prise en compte de deux types d'incendie (feux de surface, feux de cimes), ont pu être corrélées à des niveaux d'intensité [119,124].

Selon cette classification, les feux de surface qui se propagent sur de l'herbe, des arbustes ou bien des arbres, et qui ont une intensité inférieure à 2 MW/m, présentent une difficulté modérée pour les opérationnels dans leur action pour les contenir. En effet, ce type

de feux est censé ne demander que le déploiement d'équipements et des moyens de lutte terrestres (pompes à eau, tuyaux...) pour éteindre les côtés latéraux du front de flammes, et probablement arrêter le front principal. En cas de difficulté, des équipements plus lourds (hélicoptères bombardiers d'eau ou bien des tanks) peuvent être ajoutés pour contrôler le feu avec succès. Entre 2 et 4 MW/m, la difficulté de l'action des opérationnels augmente car l'attaque du front principal, qui peut présenter des longueurs de flammes entre 2,5 et 3,5 m, n'est plus possible qu'avec l'utilisation des moyens aériens qui dispersent du retardant sur le combustible. Entre 4 et 10 MW/m, le type de feu généré peut être un feu de surface ou un feu de cimes en fonction du combustible et des différentes strates végétales présentes sur le site. Les longueurs de flammes peuvent alors varier entre 3,5 et 10 m. Le contrôle devient extrêmement difficile et toute tentative de lutte contre le front de flammes principal le plus avancé est susceptible d'échouer. En effet, dans ce cas, les actions de suppression doivent être limitées à l'arrière et aux côtés latéraux du front. L'attaque indirecte par allumage aérien (contre-feu) peut être aussi efficace. En revanche, au-delà de 10 MW/m, pour un feu de cimes, les longueurs des flammes qui dépassent les 10 m avec les projections de brandons sur des distances supérieures à 1 km, engendrent de sérieux problèmes de contrôle. Cela implique que les actions de suppression ne doivent pas être tentées avant que les conditions ne s'améliorent.

### **I.5.3 Augmentation du risque dû aux feux extrêmes**

Deux millions de feux de forêt sont recensés chaque année dans le monde [89] et la plupart d'entre eux sont de petite taille en termes de superficie brûlée. Cependant, certains présentent de graves impacts écologiques et socio-économiques. C'est ainsi le cas pour les incendies qui se sont produits au Portugal en 2005 et 2017, en Espagne 2017, en Grèce en 2017 et 2018, en Australie en 2020, Californie 2021 ou en France en 2022 [125–128]. Par exemple, les feux extrêmes qui se sont déclarés en France (Gironde) en juillet et août 2022, ont brûlé près

de 30 000 hectares, un record depuis les grands incendies de 1949, et ont entraîné 50 000 évacuations préventives [129]. Au Portugal, en raison d'une sécheresse exceptionnelle, les incendies ont brûlé plus de 100 000 hectares en 2022, soit la plus grande superficie depuis les incendies meurtriers qui ont brûlé plus de 530 000 hectares en 2017 [130].

Selon des études récentes, les dégâts les plus importants sont occasionnés par des phénomènes qui constituent seulement 2% de la totalité des feux [3]. La fréquence de ces feux extrêmes continue à augmenter, les saisons propices à ce type d'incendies deviennent de plus en plus longues et un nombre croissant de régions du monde fait face à ces phénomènes. On constate une augmentation du nombre de ces incendies et surtout de leur intensité [131]. La nature des feux de forêt semble donc évoluer depuis plusieurs années [15,132]. Plusieurs facteurs contribuent à l'augmentation du risque dû à ces feux extrêmes, notamment le changement climatique et météorologique ainsi que la nature et la répartition du combustible. Un autre facteur qui joue un rôle majeur, est lié au comportement humain. L'extension des interfaces forêt-habitat, dans ou à proximité des zones sujettes au feu, en est un parfait exemple.

#### ***1.5.3.1 Effets des conditions climatiques et météorologiques***

Le climat détermine en grande partie les caractéristiques des écosystèmes et les régimes des feux [14]. En raison du changement climatique, des analyses des feux de forêt survenus en Europe au cours des 30 dernières années, montrent une augmentation de la durée de la saison des feux, avec des feux extrêmes qui se produisent en juin et Octobre à la limite des saisons des feux traditionnelles [3]. Entre 1979 et 2013, la fréquence des saisons de feux a considérablement augmenté dans de nombreuses régions du globe, notamment dans des vastes régions comme l'Argentine, le Brésil, la Chine, la Turquie, l'Afrique de l'Est, le Moyen-Orient ainsi que l'Alaska et sur la côte ouest des États-Unis et aussi dans des grandes régions du Canada, de la Russie, dans la majeure partie de l'Australie et également dans la zone méditerranéenne [133]. Par exemple, en Méditerranée des incendies importants ont été observés pendant la saison

hivernale en décembre et janvier [134]. L'augmentation des températures moyennes due au changement climatique semble être corrélée avec l'augmentation des surfaces brûlées. Cela semble être le cas au Canada où la superficie brûlée annuellement a été multipliée par trois depuis les années 1990, et a dépassé 60 000 km<sup>2</sup> de nos jours [135].

La sécheresse constitue une autre conséquence du changement climatique. Cette sécheresse joue un rôle dans le prolongement des saisons des feux. Un exemple récent est celui des incendies de forêt qui ont touché l'Australie en 2019-2020, à la suite d'une grave sécheresse qui a duré plus d'un an [136]. Des études récentes sur les feux extrêmes survenus en France entre 2003 et 2016 suggèrent l'effet croisé entre des cas de sécheresse et certaines conditions météorologiques. Par exemple, une canicule extrême combinée à des épisodes de vent extrême sont propices à ce type d'évènements [137]. Durant les périodes de sécheresse, les précipitations diminuent. Cela a comme conséquence une diminution de la teneur en eau du combustible, et donc une augmentation de son inflammabilité. Ce même effet est causé par des périodes avec de faibles taux d'humidité de l'air ambiant. Ceci est également considéré comme un facteur favorisant le développement des feux extrêmes [138]. De plus, le changement climatique n'affecte pas seulement la teneur en eau du combustible, mais aussi d'autres caractéristiques comme la charge surfacique, la continuité et la structure du couvert végétal [14,139]. Toutes ces perturbations augmentent le risque d'apparition des feux extrêmes dans les régions vulnérables à ces changements [140]. Certaines conditions météorologiques sont aussi responsables de l'augmentation du risque comme par exemple les régimes de vents forts qui sont largement liés à l'occurrence des feux extrêmes [141]. En effet, la présence d'un vent fort favorise la combustion, le préchauffage, et augmente surtout la probabilité de projections de brandons. Le vent est donc considéré comme facteur important dans l'augmentation du risque lié aux feux extrêmes.

### ***1.5.3.2 Influence de la végétation sur le risque lié aux feux extrêmes***

La végétation représente également un facteur important qui influence le risque incendie en général, et plus particulièrement celui des feux extrêmes. Cela est lié à plusieurs caractéristiques comme la teneur en eau du combustible [96,142]. Des études réalisées sur des feux en Méditerranée et sur le continent américain montrent que des larges incendies se produisent avec une teneur en eau inférieure à 77% pour le combustible vivant [34,143]. Green [144] et Weise *et al.* [145] ont décrit une augmentation progressive du danger d'incendie, à mesure que la teneur en eau du combustible vivant (LFM<sup>3</sup>) du chaparral diminue. Green a proposé une échelle de trois classes pour l'intensité des feux où l'intensité la plus élevée se produit en dessous de 60 % de LFM. Weise *et al.* ont utilisé quatre classes de danger d'incendie, où le danger élevé se situe entre 60 et 80 % de LFM, et le danger extrême en dessous de 60 % de LFM.

La teneur en eau est également corrélée à l'inflammabilité du combustible [30,32]. Ce facteur est fortement lié au changement climatique et aux périodes de sécheresse plus longues qui rendent la végétation plus sèche, augmentant ainsi le risque des feux extrêmes.

La charge surfacique et la continuité du combustible influencent considérablement le comportement des feux. Des études récentes mettent en lumière que l'augmentation de la charge surfacique du combustible mort ou extrêmement sec due au changement climatique, augmente le risque des feux extrêmes [146]. De plus, la composition de la strate de la végétation joue un rôle important. Par exemple, la présence de combustible au niveau du sol, comme l'herbe qui pousse pendant les périodes humides et se dessèche ensuite, augmente considérablement le risque des feux extrêmes pendant les périodes sèches qui suivent [147]. D'autres comportements comme l'abandon des terres agricoles et les exodes massifs des populations vers les zones urbanisées, la plantation d'espèces très inflammables et le retard dans la mise en

---

<sup>3</sup> LFM : Live Fuel Moisture

œuvre des réglementations en vue de réduire la quantité de combustible autour des habitations, rendent ces territoires plus propices à des feux de forte puissance [148].

#### **I.5.4 Influence de la topographie sur le comportement des feux extrêmes**

Une désignation des terrains complexes est attribuée aux régions ayant des reliefs relatifs et des montagnes avec des terrains en pente qui jouent un rôle important dans la propagation du feu [92]. La nature du relief montagneux crée des régimes de vent qui jouent un rôle important dans l'apparition de feux extrêmes. Un exemple qui illustre bien ce phénomène est donné par l'incendie dénommé Loop qui a eu lieu aux États-Unis en 1966. Dans un petit canyon près de la limite de la forêt nationale d'Angeles, en Californie, un feu de forêt dévastateur s'est emparé d'une équipe de pompiers hautement qualifiés du service forestier des États-Unis. Le feu s'est propagé dans le canyon, poussé dans la direction de la pente ascendante par un vent fort et sec nommé Santa Anna, causant 12 victimes [97]. D'autres phénomènes comme un vent fortement accéléré par l'effet Venturi induit par le rétrécissement d'une vallée, d'un canyon, ou bien un vent de couloir accéléré au moment de sa circulation entre deux montagnes, peuvent provoquer des changements brusques de la vitesse et de la direction du vent impactant fortement le comportement du feu [149]. Le feu de Thirtymile qui a eu lieu le 10 Juillet 2001 dans le Canyon de la rivière Chewuch, à environ 30 miles au Nord de Winthrop dans l'État de Washington, est un parfait exemple de l'influence d'un vent couloir. Lors de ce feu, le vent induit et la colonne de convection furent canalisés dans la direction du canyon, ce qui a conduit à une forte accélération de la vitesse de propagation du feu dans cette direction. Le bilan tragique de cet incendie a été la perte de quatre pompiers [150].

Lors de la propagation des incendies sur des terrains en pente, il est reporté une accélération du front de flammes qui peut parfois mener à un comportement de type extrême [151]. L'effet de la pente est ainsi assimilé à la présence d'un vent supplémentaire [152] qui, pour certaines valeurs de cette pente, est plus important que celui du vent dominant [153]. Pour

les feux éruptifs, certains avancent que le déclenchement de l'éruption ne peut se produire qu'au-dessus d'une valeur seuil de la pente. Pour des valeurs supérieures à ce seuil, l'attachement au sol des flammes du front principal expliquerait cette forte accélération [102]. Des expériences à l'échelle du laboratoire ont été menées dans l'objectif d'étudier cet effet et de tenter de déterminer cette valeur seuil. La valeur seuil constatée expérimentalement par Wu *et al.* est de 24° [154]. Selon Dupuy *et al.*, pour un angle de pente compris entre 20° et 30°, le transfert de chaleur convectif entre le front de flammes et la végétation non brûlée augmente, ce qui augmente le ROS d'un facteur de 2,5 [155]. Pour beaucoup de scientifiques, les feux se propageant sur des terrains en pente de types canyons ou tranchées (entre deux montagnes, rétrécissement de vallée), sont fortement sujets à des phénomènes d'éruption [93,94]. En effet, ces configurations ont pour conséquence de limiter l'aspiration d'air sur les côtés de l'incendie, et de favoriser aussi l'attachement des flammes au sol. Les feux sur ce type de territoire entraînent une accélération du front de flammes, ce qui peut conduire à des phénomènes éruptifs [103,156]. La topographie est donc un paramètre important dans l'étude de la propagation du front de flammes, notamment en ce qui concerne l'interaction entre le feu et son environnement, qui peut conduire à des feux de forte puissance, voire éruptifs.

## **I.5.5 Conséquences des feux extrêmes**

### ***I.5.5.1 Conséquences sur la santé***

La conséquence directe des feux de forêt sur les êtres humains se traduit par des décès causés par un contact avec les flammes, une exposition à des flux de chaleur élevés, ou bien par l'intoxication d'une quantité importante de monoxyde de carbone émis durant un incendie [157]. Par exemple, en 2018, des feux extrêmes ont causé la mort de 80 personnes au Portugal, 130 personnes environ en Grèce et 90 personnes en Californie. Ceci est considéré comme un impact local [131]. Cependant, l'impact se traduit également à l'échelle régionale ou nationale. En effet, certains feux de forêt engendrent l'émission de particules qui peuvent affecter des

populations situées à des dizaines, voire des centaines de kilomètres de l'incendie. Ces émissions contribuent à une mauvaise qualité de l'air qui est constitué d'un mélange de dioxyde de carbone, de monoxyde de carbone, de particules en suspension, de vapeur d'eau, d'oxydes d'azote, et de divers minéraux. Ces émissions varient en fonction de plusieurs facteurs comme le type de végétation, la dynamique du feu et les conditions météorologiques. D'où, la nécessité de déterminer la distance parcourue par les particules émises, surtout durant les feux de forêt plus puissants ou extrêmes, qui sont susceptibles de provoquer beaucoup d'émissions [134]. L'exposition prolongée à ces émissions, et donc aux particules en suspension dans l'air, a des effets à court et à long terme sur la santé, tels que des problèmes respiratoires, cardiaques et oculaires [158]. D'autres conséquences des incendies sont liées à la contamination possible de l'eau consommée par l'homme avec des particules volatiles (COV) et du benzène, qui peuvent parfois dépasser les valeurs limites [159].

Les effets ne se limitent pas seulement à la santé physique de l'être humain mais touchent aussi sa santé mentale et parfois sa vie sociale. En effet, ces phénomènes peuvent engendrer des problèmes psychiques comme le stress et la dépression en réponse à un choc aigu, suite par exemple à des évacuations et déplacements de populations. De plus, dans le cas d'un feu de forte puissance, même si cet événement ne cause pas de morts, il peut néanmoins gravement perturber les sources de revenus des populations et mettre en péril leurs moyens de subsistance. Il est également important de prendre en compte le fait que vivre des de tels événements peut se transformer en stress post-traumatique [160].

#### ***1.5.5.2 Conséquences économiques***

Les feux extrêmes peuvent aussi engendrer des conséquences économiques importantes. Les coûts évidents d'une telle catastrophe prennent en compte les dommages directs causés aux habitations, aux infrastructures ainsi que les pertes de ressources naturelles comme le bois et même la production agricole. Cependant, d'un point de vue économique, les coûts sont

susceptibles d'augmenter encore plus dans les zones où l'interface forêt-habitat et la densité de population sont élevés. S'y ajoutent, d'autres coûts comme ceux qui sont liés aux moyens mis en œuvre lors des interventions, pour tenter d'éteindre ou de contenir l'incendie pendant l'évènement. Il convient également de mentionner les fonds destinés à la remise en état des territoires et aux frais médicaux pour le bien-être des populations touchées. Les feux extrêmes qui ont eu lieu en Californie en 2018 ont ainsi engendré des pertes économiques globales dont le montant a été évalué à 150 milliards de dollars [161]. Une étude a estimé à environ 180 millions de dollars australien (AUD) le coût annuel des incendies de forêt dans l'État de Victoria. Cette même étude prédit que ce montant devrait doubler au cours des 40 prochaines années [162].

### ***1.5.5.3 Conséquences sur les écosystèmes***

Il a été écrit précédemment que la communauté scientifique s'accordait à dire que le changement climatique augmente la fréquence des feux de forêt de forte puissance. Ces feux extrêmes peuvent également contribuer au changement climatique. En effet, ils libèrent en grande quantité des gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le dioxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Ces feux peuvent causer aussi de considérables perturbations au niveau de la biodiversité, avec des conséquences aux niveaux local, régional, et mondial. Ces feux extrêmes qui se produisent souvent après des périodes de sécheresse extrême peuvent entraver la capacité des écosystèmes à se rétablir et à se régénérer. Ce fut le cas des feux en Australie de 2019-2020 qui ont causé la mort d'un milliard d'animaux en plus de la destruction d'habitations et des zones agricoles [163]. Les écosystèmes qui subissent des feux prolongés et de forte puissance peuvent aussi changer dans ces zones et passer de zones boisées à de la prairie, ou bien de forêts tropicales à de la savane [164]. Ces incendies sont donc susceptibles d'accélérer la déforestation [165]. Ce phénomène est présent dans l'État américain du Colorado qui a vu une augmentation des sites d'incendie où aucune repousse de végétation n'a été

constatée. La superficie de telles zones est passée de 19% à 32% entre 2000 et 2011 dans le Colorado [165].

### **I.5.6 Techniques de réduction du risque lié aux incendies de forte puissance**

Afin de réduire la probabilité d'occurrence des feux, il faut mettre en œuvre des politiques de lutte et de prévention qui permettent de minimiser les dégâts occasionnés par la propagation d'un feu de forte puissance. Le risque lié à ce type d'incendies, comme cela a été noté précédemment, dépend des conditions climatiques et météorologiques, des facteurs humains et aussi de la végétation. Ces deux derniers, au contraire de la météo et des facteurs de départ du feu naturel, peuvent être minimisés par des actions positives qui permettent de réduire le risque incendie. Plusieurs techniques existent afin de changer certaines caractéristiques de la végétation, qui peuvent par la suite modifier le comportement d'un feu, en réduisant sa vitesse de propagation et donc son intensité.

La réduction de la quantité de combustible au niveau du sol, permet de modifier la continuité, la charge surfacique de la végétation ou bien sa nature. Ceci a pour effet de diminuer le potentiel destructeur d'un feu, en limitant la surface parcourue mais également en réduisant sa capacité de passer d'un feu de surface à un feu de cimes [39]. Cette technique de réduction du risque peut être mise en œuvre par l'implantation de coupures de combustible [166] et l'usage de feux dirigés pendant les saisons hivernales [167]. Les coupures de combustible permettent de réduire la probabilité de départ de feux en enlevant la végétation des endroits vulnérables, et elles permettent aussi la création des zones de sécurité pour les opérationnels en phase de lutte [117,168,169]. Cette technique est largement pratiquée en Corse sous le nom de Zone d'Appui à la Lutte (ZAL) [117]. Concernant les brûlages dirigés, ils permettent de réduire facilement la charge de la biomasse inflammable, comme par exemple les feuilles et les débris morts provenant des arbres et aussi les herbes sèches en sous-bois. Cette technique est utilisée

depuis l'antiquité afin d'aménager le territoire [170] mais aussi comme un outil de réduction du risque incendie depuis les années 1907 aux états unis [35,170]. C'est une technique facile à mettre en œuvre et beaucoup moins onéreuse que celle qui fait appel aux engins mécaniques. De plus, elle s'avère souvent être la seule pouvant servir dans les zones d'accès difficiles [171,172]. C'est également une technique qui s'avère efficace dans la réalisation et la maintenance des coupures de combustible.

Une autre technique de réduction du risque est celle qui consiste à intervenir sur la strate supérieure des arbres. Augmenter la distance séparant la canopée de la strate basse de la végétation permet d'augmenter la quantité de chaleur qui doit être émise par un feu de surface pour préchauffer, puis enflammer cette canopée. Ce principe de traitement, en addition avec la réduction de la densité de la canopée, est principalement utilisé pour réduire le développement d'un feu de cimes [92]. Un autre principe de prévention est basé sur la sauvegarde des arbres les plus grands et plus résistants aux feux. Ces arbres ayant une écorce épaisse et des hauteurs de cimes élevées, ainsi que des densités de peuplement faibles, permettent de réduire la probabilité d'occurrence des feux de cimes et favorisent également des propagations de moindre intensité. Toutes ces mesures ont pour objectif principal de diminuer la vulnérabilité des forêts et font partie de l'aménagement et de la gestion des territoires.

Les dégâts engendrés par un feu extrême, sont aussi liés à la manière de vivre des populations sur le territoire, aux comportements des citoyens, aux moyens mis en œuvre pour les anticiper, aux dispositifs déployés pour réduire et gérer ce risque avant qu'il ne se produise et aussi au développement des connaissances et des compétences nécessaires pour augmenter la capacité d'adaptation et savoir tirer les leçons des événements passés. Les interfaces forêt-habitat qui sont des zones particulièrement vulnérables et qui ont tendance à augmenter ces dernières années, ont amené les pouvoirs publics à adapter leurs politiques pour faire face au risque incendie. C'est ainsi que depuis les années 60, des politiques de protection et de

préventions ont été mises en place dans certaines régions comme la région méditerranéenne [173,174]. Ces politiques regroupent plusieurs actions qui visent à diminuer les départs des feux et la probabilité des mises à feu. Elles tentent d'éliminer les imprudences liées aux travaux dans les forêts, loisirs et autres activités qui peuvent causer un départ involontaire. Dans ce contexte, la surveillance des massifs forestiers et les enquêtes réalisées sur le terrain, contribuent à détecter les points de départ potentiels des incendies afin de pouvoir les contrôler le plus tôt possible, avant qu'ils ne se transforment en feux incontrôlables. En Croatie, un réseau de caméras fixes est utilisé par les forestiers afin de surveiller le territoire [175,176].

D'autres actions ayant comme objectif la réduction du risque incendie, se traduisent par des actions de sensibilisation de la population. Cela consiste à fournir aux populations une meilleure connaissance des attitudes à avoir avant, pendant et après cet événement, pour en réduire ses conséquences. Des actions qui permettent l'amélioration de la communication entre les habitants des territoires et les services de sécurité par le biais de différents moyens comme des colloques, des formations ou des rencontres, sont ainsi mises en place. De nos jours, la population a de plus en plus besoin d'une meilleure connaissance sur le potentiel d'inflammabilité de la végétation ornementale et de la façon de l'utiliser autour de des habitations [177]. Cela fait partie de la gestion de l'interface forêts-habitat. En effet, la gestion des paysages doit être pris en compte pour réglementer ces zones et leurs environs [177], afin de mieux planifier leur extension en tenant compte du nouveau contexte devant lequel nous nous trouvons.

Les dépenses consacrées aux politiques de lutte contre les incendies augmentent continuellement mais malgré cela, beaucoup de pays font face à des feux extrêmes [132]. En Europe, une stratégie de gestion globale des feux de forêt est nécessaire. Cette nouvelle stratégie doit s'appuyer sur les plans et les mesures qui existent déjà pour faire une part plus grande à la prévention. En effet, en 2006, La FAO (*Food and Agriculture Organization*) des Nations-Unis

a indiqué qu'il était temps de passer à plus de prévention en déclarant que la prévention des incendies de forêt peut être le programme le plus rentable et le plus efficace qu'une agence ou une communauté puisse mettre en œuvre pour faire face au risque incendie [178].

## **I.6 La modélisation : anticipation du risque incendie par différentes approches**

Les feux extrêmes sont de plus en plus nombreux dans différentes régions du globe avec d'importantes conséquences sur les populations, l'économie et les écosystèmes [3,179,180]. Dans les années à venir, l'estimation du risque incendie s'avère donc un enjeu majeur dans ces régions. Le passage de la lutte à la prévention exige un bouleversement des politiques de gestion et d'aménagement du territoire, ainsi qu'une implication plus forte des scientifiques, afin de répondre aux demandes des opérationnels et mieux comprendre le comportement de ces phénomènes liés à ce nouveau contexte. Ainsi, les sciences et les technologies sont amenées à jouer un rôle majeur dans la réduction du risque lié aux feux de forêt. Certains pays à travers le monde ont mis en place des systèmes qui permettent une évaluation journalière du risque. C'est le cas du Canada avec son « *Canadian Meteorological Fire Hazard Indicator* » [36,181,182], de la France où on estime le risque incendie par l'Indice Feu-Météo, IFM, de MétéoFrance qui se base sur celui développé par les canadiens, ou de la Slovaquie qui calcule le risque incendie trois jours à l'avance en utilisant les modèles météorologiques ALADIN [183] et INCA [184], puis en publiant les résultats sur un site web en accès libre [185].

La modélisation constitue aussi un moyen pour anticiper le risque des feux de forêt et évaluer leurs impacts. Depuis une cinquantaine d'années, la communauté scientifique s'attache à modéliser les phénomènes chimiques et physiques présents lors d'un incendie afin de prédire son comportement, en quantifiant des grandeurs comme sa vitesse de propagation, son intensité et les caractéristiques géométriques de son front de flammes [186–188]. Ces études fournissent des renseignements aux opérationnels afin de développer des outils d'aide à la décision et

d'aménagement du territoire [189]. Les modèles décrivant le comportement des feux de forêt sont communément classés suivant différentes catégories proposées initialement par Weber : empiriques, semi-empiriques et physiques complets [190].

Les modèles empiriques sont tirés d'une analyse statistique d'observations et mesures réalisées sur des feux expérimentaux conduits à différentes échelles [186,188,191]. Le traitement des données par les modèles statistiques, ne prend pas en compte les lois physiques et chimiques des phénomènes étudiés. L'avantage majeur de ce type de modèles se trouve dans la simplicité de son utilisation. Pour cette raison, ces modèles sont habituellement utilisés par les opérationnels dans plusieurs pays du monde comme les États-Unis ou l'Australie [192]. Cependant, leur principal défaut demeure dans le fait qu'ils dépendent fortement des données expérimentales utilisées pour leur conception. Pour cela, leurs domaines d'utilisation s'avèrent donc très restreints et limités exclusivement aux configurations semblables, ou très proches, de celles utilisées pour les concevoir. Par exemple, un modèle conçu à l'échelle du laboratoire sur de la litière morte, ne peut, en aucun cas, être considéré comme fiable à l'échelle du terrain pour étudier une propagation d'un incendie. Ces contraintes fortes liées au type du combustible utilisé lors des expériences, et à l'échelle de ces dernières, rendent l'utilisation de ces modèles compliquée pour la conception d'outils fiables pour l'aide à la décision et d'aménagement du territoire.

Les modèles semi-empiriques sont basés sur le principe de conservation de l'énergie. Cependant, ces modèles ne différencient pas les différents modes de transfert et utilisent des paramètres obtenus expérimentalement. De plus, ils ne prennent pas non plus en compte des réactions chimiques présentes durant la propagation des feux. Le plus connu de ces modèles est celui proposé en 1972 par Rothermel [42] et qui demeure encore le plus utilisé dans les simulateurs opérationnels comme par exemple BEHAVE [193].

Une autre approche est basée sur la prise en compte des mécanismes qui interviennent lors d'un feu de forêt. Ces modèles intègrent les différents modes de transfert de chaleurs. Ainsi, les modèles physiques complets étudient le comportement des feux de forêt en prenant en compte tous les aspects chimiques et physiques. Les modèles WFDS [194], FireStar2D [195], FireStar3D [196] et FIRETEC [197], sont des modèles très utilisés par la communauté scientifique. La plupart de ces modèles sont basés sur l'approche multiphasique proposée en 1997 par Grishin [198], qui prend en compte les différents phénomènes physicochimiques en appliquant les lois de conservation d'énergie, de masse, et de la quantité de mouvement dans les phases gazeuse et solide. Il est à noter que ces modèles sont surtout utilisés pour mieux appréhender le comportement des feux à différentes échelles sur différents types de végétation. Pour l'instant, leur utilisation opérationnelle s'avère réduite car ils nécessitent un temps de calcul important. Un autre aspect de cette approche physique comprend des modèles physiques simplifiés obtenus après certaines hypothèses simplificatrices, et validées ou améliorées après des confrontations à des feux à différentes échelles [199–206]. Ces modèles simplifiés permettent d'obtenir différentes caractéristiques de la dynamique du front de flammes, avec un temps de calcul très faible. Ils donnent également la possibilité d'estimer l'impact du feu sur des personnes ou bien des cibles. Ils sont donc de sérieux candidats pour servir de cœur aux simulateurs dédiés à l'aide à la décision ou à l'aménagement du territoire.

Il a été vu précédemment que la modélisation d'un feu de forêt dépendait de plusieurs facteurs. La connaissance du couvert végétal est l'un des plus importants. Il faut donc réussir à quantifier convenablement les différentes caractéristiques du combustible. Des innovations technologiques, telles que les systèmes de télémétrie et de télédétection (LiDAR), ont permis la caractérisation des couverts forestiers sur de vastes étendues, avec des précisions comparables aux mesures faites avec des méthodes plus conventionnelles, mais avec une rapidité d'exécution sans commune mesure [207]. À l'échelle du terrain, cela a donc permis la

réalisation des cartographies réalistes de couverts végétaux. Une classification proposée par Sanderberg *et al.* décrit six strates dans la végétation en partant du sol jusqu'à la canopée [208]. Les modèles de végétation à petite échelle (ou échelle locale) qui décrivent de manière détaillée la structure de la végétation, sont souvent utilisés comme paramètres d'entrées des modèles complets. En effet, ces modèles physiques complets sont capables de prendre en compte les différentes strates du combustible, leurs répartitions dans l'espace, la charge surfacique, la fraction volumique de chaque espèce ainsi que sa teneur en eau, leur taille et la prise en compte des discontinuités horizontales et verticales. Il existe aussi des modèles de végétation plus simples qui, pour un combustible hétérogène formé de plusieurs strates ou espèces, attribuent une valeur moyenne pour chaque paramètre caractérisant le combustible. Cette approche débouche sur l'obtention d'un modèle homogène de végétation équivalent à une seule strate et une seule espèce. Ces modèles de végétation sont utilisés par exemple dans les modèles proposés par Rothermel ou Balbi [42,205]. Quel que soit le type de modèle de végétation utilisés, seules les particules fines ayant un rapport surface / volume  $> 600 \text{ m}^{-1}$  contribuent à la propagation [57,209]. Cette affirmation a été confirmée par des observations lors de nombreux feux de forêt qui ont montré qu'environ 90% des particules fines du combustible sont consommées dans la zone de combustion [61]. Ces particules appartiennent aux différents éléments du combustible comme les feuilles, les branches, les aiguilles ou les écorces. Les particules du combustible ne sont pas seulement classifiées selon leurs tailles mais aussi selon leur état. Par exemple, en Europe, les particules fines sont divisées en deux classes : vivant et mort [210]. Il est à noter que pour chaque classe de particules, il existe différents paramètres à déterminer. C'est ainsi que les caractéristiques physiques concernant la géométrie de la particule (longueur, largeur, diamètre, épaisseur ou volume) et la masse, sont mesurées. D'autres caractéristiques comme la masse volumique, le rapport surface / volume ou la fraction volumique sont calculées. Les propriétés chimiques, la teneur en eau dans chaque classe de particules sont aussi très

importantes pour modéliser finement un incendie. En ce qui concerne les caractéristiques thermiques, il est essentiel de connaître l'enthalpie de combustion et le pouvoir calorifique de chaque classe.

## **I.7 Apport du travail et plan du mémoire**

Les feux de forte puissance sont un type des feux extrêmes qui commencent à devenir la nouvelle norme par l'augmentation de leur fréquence et ampleur dans le monde entier. Comme précisé précédemment, plusieurs facteurs contribuent à l'augmentation du risque des feux extrêmes. Dans ce contexte, l'un des principaux objectifs de cette thèse est de comprendre ces phénomènes à travers des feux expérimentaux réalisés à l'échelle du terrain, ce qui s'avère très important, afin de pouvoir anticiper le comportement de ce type d'incendie. Cela permet en premier lieu de fournir des renseignements utiles aux opérationnels en phase de lutte, concernant la dynamique de ces feux. Ainsi, l'évaluation des conditions qui permettent de déclencher un feu de forte puissance permet de limiter le risque de ces incendies et mettre en place des politiques de prévention et d'aménagement du territoire. En effet, les feux expérimentaux réalisés dans le cadre de cette thèse fournissent des informations détaillées, des observations, ainsi que des données d'entrée nécessaires pour la modélisation numérique des feux de forte puissance. Cela permet de tester la pertinence des modèles physiques complets FireStar2D et 3D. Dans le cadre de la prévention et de l'anticipation des comportements des feux extrêmes, ces modèles, une fois testés, peuvent être utilisés pour simuler différents types de configuration de feux de forte puissance, sans avoir nécessairement recours à l'expérimentation. Ces modèles sont utilisés non seulement pour étudier la dynamique des feux de forêt, mais aussi pour calculer les distances de sécurité. En effet, l'objectif de la deuxième partie de cette thèse est d'évaluer numériquement, sur FireStar2D, ces distances de sécurité, fixés à 50 m autour des habitations dans les interfaces forêt-habitat selon la réglementation des Obligations Légales de Débroussaillage (OLD), dans un cas d'un feu de forte puissance.

Dans ce contexte, le deuxième chapitre de cette thèse présente en détail les modèles physiques complets FireStar2D et 3D qui serviront à étudier numériquement des feux expérimentaux menés à l'échelle du terrain dans le cadre du projet GOLIAT<sup>4</sup>, en collaboration avec les opérationnels corses (SIS 2A, 2B, service DFCI de la Collectivité de Corse), selon trois configurations différentes, en hiver et en automne, suivant un protocole expérimental bien défini. Le troisième chapitre de ce mémoire constitue une description détaillée de la méthode expérimentale et le choix des sites, avec les techniques et technologies employées qui permettent de caractériser ces feux, observer et analyser leur propagation.

Les configurations et domaines numériques, ainsi que les méthodes de calcul des paramètres qui caractérisent la dynamique et l'impact d'un feu, sont présentées dans le quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre montre les résultats numériques obtenus concernant la modélisation des feux expérimentaux. L'un des objectifs principaux de la thèse était de tester la pertinence de ces modèles physiques complets dans la prédiction du comportement et l'impact des feux de surface de forte puissance. Une confrontation des résultats numériques avec les mesures expérimentales est présentée, ainsi que des tests numériques qui justifient le choix de certaines hypothèses lors de la modélisation.

Le dernier chapitre constitue un cas d'étude d'un feu, nommé « cas critique », suite à une demande du GTI (Groupe Technique Interdépartemental), afin de démontrer la pertinence d'une contribution scientifique pour évaluer l'efficacité des distances de sécurité de 50 m dans les interfaces forêt-habitat. Ce chapitre est divisé en deux parties principales, où la première porte sur l'étude de la dynamique du feu selon différentes approches physiques et empiriques, et où la deuxième se focalise sur l'évaluation de l'impact du feu sur deux cibles (corps humain et bâtiment).

---

<sup>4</sup> Groupement d'Outils pour la Lutte Incendie et l'Aménagement du Territoire

Enfin, les conclusions de ce mémoire et les perspectives envisagées seront présentées.

# Chapitre II. Modèles physiques pour simulations numériques

---

La plupart des outils opérationnels utilisés pour prédire la propagation d'un feu de forêt sont basés sur des approches empiriques ou semi-empiriques. Ces prédictions conduisent à des résultats souvent inutilisables notamment lorsqu'elles sont effectuées pour des conditions différentes de celles utilisées pour la conception des modèles. Ce constat confirme le besoin de développer des modèles physiques qui prédisent le comportement de manière plus fiable. Ainsi, la vitesse, l'intensité ainsi que les différentes propriétés géométriques du front de flammes (inclinaison, hauteur, épaisseur, etc.) pourront servir aux opérationnels dans leurs actions de réduction du risque sur le terrain. Dans le cadre du présent travail, l'ensemble des investigations numériques a été mené en utilisant le code de calcul FireStar dans ses deux versions (2D et 3D). [55–59,211,212] basé sur un modèle physique dit complet, et le modèle de Balbi [205] qui est un modèle physique simplifié capable décrire d'une façon relativement précise décrivant la propagation d'un incendie à l'échelle du terrain.

## II.1 Présentation du modèle FireStar

FireStar est un code de calcul basé sur une formulation multiphasique et utilisé pour mieux comprendre le comportement des feux de forêt. Les versions 2D et 3D de ce code ont été développées grâce à une collaboration entre les universités d'Aix Marseille, de Toulon et l'Université Libanaise. Ce code inspiré du modèle de Grishin [198], modélise de manière détaillée des phénomènes physiques et chimiques qui interviennent depuis la dégradation de la végétation jusqu'au développement du front de flammes turbulent au-dessus de la strate

végétale lors de la propagation d'un feu à travers un milieu poreux. L'objet du présent paragraphe est de présenter les grandes lignes et contours du modèle avant d'aborder les approches utilisées de façon détaillée.

FireStar est outil basé sur une approche multiphasique assortie d'une approximation à faible nombres de Mach [213]. Ce type d'approximation permet de prendre en compte les effets de dilatabilité du fluide en régime subsonique tout en filtrant les ondes acoustiques. Le modèle intègre les principaux aspects des phénomènes liés à la propagation d'un incendie avec une prise en compte des caractéristiques détaillées du combustible, des conditions météorologiques et de la topographie du terrain. Dans l'approche multiphasique, la phase solide est représentée par un milieu poreux et la phase fluide est un mélange gazeux constitué d'air et de produits issus de la pyrolyse.

Concernant la phase gazeuse, son évolution est déterminée résolvant les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie du mélange gazeux constitué des espèces chimiques suivantes :  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  et  $H_2O$ . La relation de dépendance entre la température du mélange gazeux et l'enthalpie est basée sur les tables thermodynamiques de CHEMKIN [214]. Le taux de combustion en phase gazeuse est donné par un modèle basé sur le concept de diffusion turbulente EDC « Eddy Dissipation Concept » [215,216]. Les écoulements de nature turbulente sont résolus soit via une approche statistique moyennées (RANS), soit via une approche basée sur la résolution des grandes échelles (LES) [217,218]. Par ailleurs, la fraction volumique des suies contenues dans la phase gazeuse est donnée par la résolution d'une équation de transport prenant en compte la contribution thermophorétique au niveau de la convection et de l'oxydation. La présence des particules de suies dans la phase gazeuse contribue au transfert de chaleur par rayonnement qui joue un rôle important dans la propagation du feu.

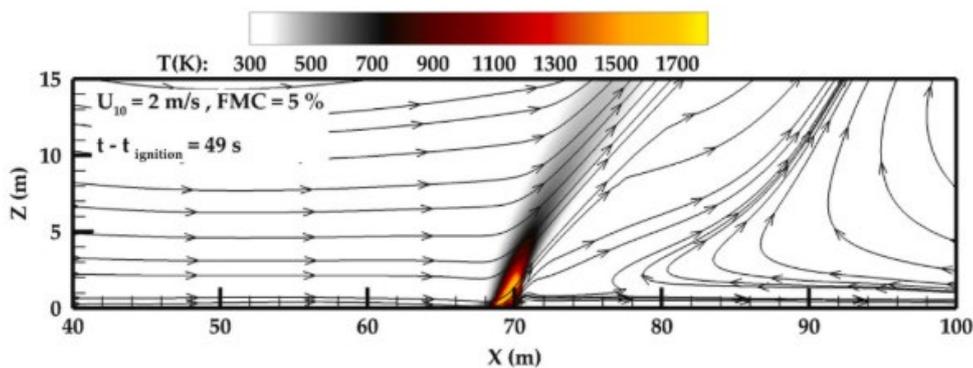
La dégradation de la phase solide est modélisée en utilisant trois phases successives : la déshydratation, la pyrolyse et la combustion. La végétation prise en compte peut être constituée de différentes familles de particules solides comme, par exemple, des tiges, des feuilles, des troncs, etc. Chaque famille a ses propres propriétés telles que la forme, la taille, la fraction volumique, le rapport surface / volume, la charge surfacique ou la masse volumique. La dégradation de la végétation est matérialisée par l'évolution au cours du temps des différents constituants de la phase solide qui sont la teneur en eau, la matière sèche, le charbon et les cendres. Cette dégradation est gouvernée par un système d'équations différentielles ainsi que des équations différentielles d'évolution de la masse totale du solide, de sa température et de sa fraction volumique.

L'interaction entre la phase gazeuse et la phase solide se traduit par des transferts de chaleur et de masse. La présence de la phase solide est prise en compte par l'ajout de termes de traînée aérodynamique dans les équations de conservation et de transport. Concernant le transfert de chaleur entre le mélange gazeux et le combustible solide, il est basé sur l'utilisation de corrélations empiriques pour évaluer le coefficient de transfert convectif et également sur la résolution de l'équation de transfert de chaleur radiatif.

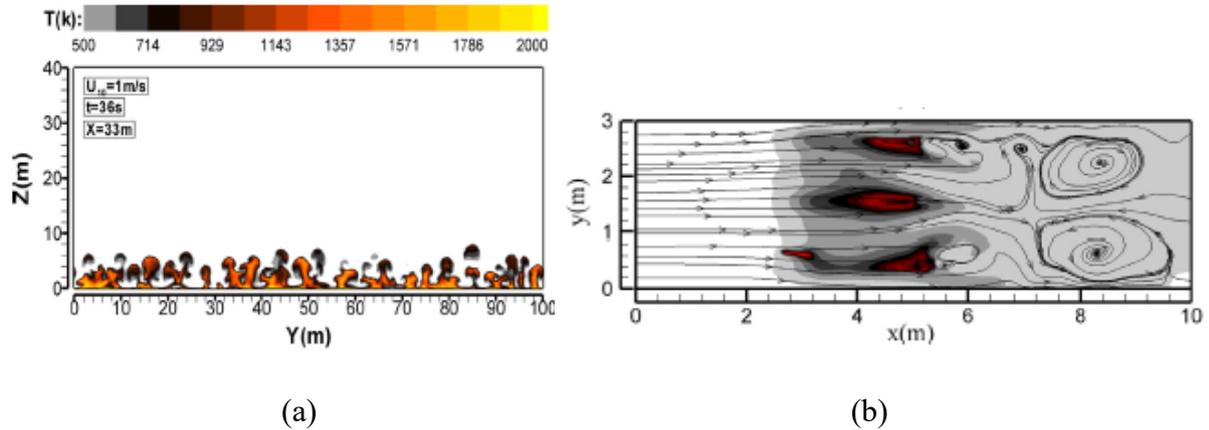
L'approche physique dite complète de FireStar permet donc d'étudier la propagation d'un feu à travers un combustible homogène comme de l'herbe [56,219], un lit d'aiguilles [27], du maquis [59,212] mais également une végétation plus hétérogène formée de plusieurs strates comme une pinède [220]. Cette approche peut donc être envisagée comme un outil d'anticipation pour plusieurs configurations et à différentes échelles [57,211,219]. C'est également un outil qui peut être utilisé pour la prévention dans la mesure où il permet d'évaluer l'efficacité de certaines techniques de gestion et d'aménagement du territoire telles que la réduction optimale du combustible sur certaines zones et le dimensionnement des coupures de combustible [221,222]. Cependant, le code FireStar nécessite des temps de résolution beaucoup

plus importants comparativement à ceux des autres approches (empiriques, semi-empiriques et ceux basés sur la physique simplifiée). À l'heure actuelle, cela demeure un frein à son utilisation pour livrer des informations en temps réel.

L'approximation 2D constitue la 1<sup>ère</sup> version de FireStar. Dans le cas bidimensionnel, le problème est résolu dans un plan vertical. Cependant, FireStar 3D permet de représenter les effets 3D observés lors d'un feu réel [223]. La différence majeure entre ces deux versions réside dans le fait que FireStar2D présente le front de flammes comme étant un obstacle homogène qui engendre une déviation verticale du flux de vent entrant dans la direction du panache (figure II-1). En revanche, FireStar3D rend compte de l'hétérogénéité du front de flammes formé par des crêtes et des creux, oscillant sous l'effet de l'instabilité thermo-convective (figure II-2). Avec la version 3D, le passage du vent à travers le front de flammes est possible et, par conséquent, la modélisation devrait conduire à des résultats relativement plus réalistes. Cette différence de comportement au niveau du front de flammes, contribue à une modification dans la trajectoire de la flamme et du panache et peut aussi influencer l'interaction entre le front et la végétation [57].



**Figure II-1.** Champs de températures et lignes de courants obtenus par simulation numérique sur FireStar2D [224]



**Figure II-2.** Champs de températures et lignes de courants obtenus par simulation numérique sur FireStar3D dans les plans : (a) Z-Y ; (b) X-Y [58]

Cependant, étant donné l'antériorité du code 2D et le fait que la modélisation employée dans le modèle 3D soit fortement inspirée de ce qui a été testé dans le cas 2D, on se contente de présenter la formulation multiphasique utilisée dans FireStar3D qui décrit les différentes méthodes mathématiques et numériques présentes dans cette version du code de calcul.

## II.1.1 Modélisation mathématique

FireStar est basé sur une formulation multiphasique mettant en jeu une phase gazeuse et une phase solide, interagissant par le biais de transferts de chaleur et de masse. Les parties suivantes vont présenter une description détaillée de la modélisation de ces deux phases. Cette modélisation décrit l'évolution temporelle du combustible solide exposé aux flux thermiques émis par le front de flammes, dans la zone de combustion, ainsi que l'évolution du mélange gazeux formé par les produits de pyrolyse, suite à la dégradation de la végétation et son interaction avec l'air ambiant.

### II.1.1.1 Modélisation de la phase solide

La modélisation d'une végétation hétérogène est prise en compte en caractérisant chaque élément suivant une famille  $m$ . Chaque famille possède ainsi des caractéristiques physico-chimiques propres. Ces familles (feuilles, tiges...) peuvent aussi avoir des formes de particules variées (cylindre, sphère, disque) et des propriétés spécifiques comme la fraction

volumique ( $\beta_s$ ), la masse volumique de la matière sèche ( $\rho_{sec}$ ), la teneur en eau ( $m$ ), le rapport surface / volume ( $s_s$ ) et la température ( $T_s$ ).

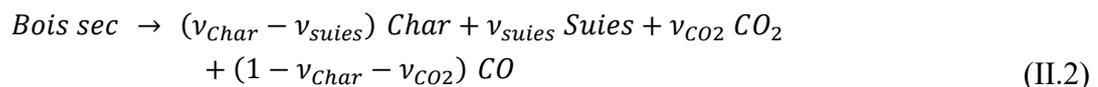
Seules les particules fines (ayant un rapport surface / volume  $> 600 \text{ m}^{-1}$ , soit à titre d'exemple un diamètre inférieur à 6 mm pour le cas de la forme cylindrique) contribuent effectivement à la propagation du feu [61]. L'exposition de ces particules solides aux flux thermiques émis par le front de flammes permet leur décomposition au cours de trois phases consécutives : la déshydratation, la pyrolyse, et la combustion. Durant cette décomposition, plusieurs éléments sont produits, comme l'eau, la matière sèche (cellulose, hémicellulose et lignine), le charbon et la cendre, caractérisés par leurs fractions massiques respectives  $Y_{H_2O}$ ,  $Y_{Sec}$ ,  $Y_{Char}$  et  $Y_{Cendre}$  résultant en une masse volumique locale du lit de combustible  $\rho_s$ .

**La phase de déshydratation :** Ce phénomène isotherme représente une simple évaporation de l'eau contenue dans la végétation lorsque la température du combustible atteint  $T_s = 373 \text{ K}$ . La quantité de chaleur reçue par le combustible  $\dot{Q}_s$  durant cette phase, permet de déterminer la masse de la vapeur d'eau produite  $\dot{M}_{H_2O}$  :

$$\dot{\omega}_{vap} = \dot{M}_{H_2O} = \frac{\dot{Q}_s}{\Delta h_{vap}} \quad (\text{II.1})$$

Où  $\Delta h_{vap}$  représente l'enthalpie de vaporisation et est égale à  $2,25 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ .

**La Phase de pyrolyse :** À la fin de la phase de déshydratation, la température du combustible continue à augmenter jusqu'à 400 K. A cette température, la phase de pyrolyse se déclenche. La décomposition du combustible sec par pyrolyse produit un mélange gazeux de monoxyde et dioxyde de carbone ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) et de charbon :



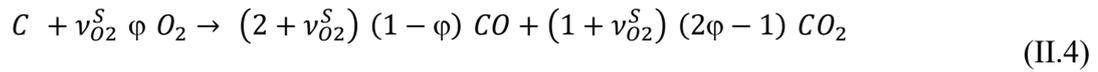
Où  $v_{Char}$ ,  $v_{suies}$ ,  $v_{CO_2}$ , représentent les masses respectives du charbon, des suies et du  $\text{CO}_2$  produits par la composition du combustible, sachant que 1 kg de ce combustible produit les quantités suivantes :  $v_{Char} = 0,338 \text{ kg}$ ,  $v_{CO_2} = 0,2 \text{ kg}$  et  $v_{CO} = 1 - v_{Char} - v_{CO_2} = 0.462 \text{ kg}$ . On

suppose en outre que la partie charbon contient  $v_{suies} = 0,05$  kg de suie qui est transportée dans la phase gazeuse. Grace à l'oxygène contenu dans l'air, le mélange des produits de pyrolyse (CO et suies) peut s'enflammer dans la phase gazeuse. Cette transformation a lieu entre 400 et 500 K [195]. La température du solide reste à une valeur constante de 500 K jusqu'à la fin de cette phase avec un taux de pyrolyse donné par :

$$\dot{\omega}_{pyr} = \frac{\dot{Q}_s}{\Delta h_{pyr}} \times \frac{T_s - 400}{500 - 400} \quad (\text{II.3})$$

Avec  $\Delta h_{pyr}$  qui représente l'enthalpie de pyrolyse dont la valeur dépend du type de végétation.

**La phase d'oxydation :** Le modèle prend en compte la combustion incomplète du charbon produisant du CO et du CO<sub>2</sub> selon l'équation suivante [225] :



Où  $v_{O_2}^s = 8/3$  et  $\varphi$  représente le coefficient de masse stœchiométrique déterminé à partir de la fraction molaire  $\frac{CO}{CO_2}$  en utilisant la formule [225] :

$$\varphi = \frac{2 + \frac{CO}{CO_2}}{2 \frac{CO}{CO_2} + 2} \quad (\text{II.5})$$

La fraction molaire  $\frac{CO}{CO_2}$  dépend de la température de surface  $T_s$  du combustible [225] :

$$\frac{CO}{CO_2} = 2500 \exp\left(-\frac{6240}{T_s}\right) \quad (\text{II.6})$$

Le taux d'oxydation du charbon  $\dot{\omega}_{char}$  suit une loi d'Arrhenius :

$$\dot{\omega}_{char} = k_{char} P_{O_2} \exp\left(-\frac{E_{char}}{R_0 T_s}\right) \beta_s s_s \quad (\text{II.7})$$

Où  $P_{O_2}$  représente la pression de O<sub>2</sub> à la surface d'une particule solide. Le facteur de fréquence  $k_{char} = 254,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$  et l'énergie d'activation  $E_{char}/R_0 = 9000 \text{ K}$  sont évalués expérimentalement [225] :

La chaleur libérée durant la combustion du charbon qui a lieu à la surface de la végétation est absorbée par les phases solide et gazeuse avec un taux de transfert calculé comme suivant :

$$\dot{Q}_{S,Char} = \alpha_{SG} \Delta h_{Char} \dot{\omega}_{Char} \quad (\text{II.8})$$

Avec  $\Delta h_{Char}$  l'enthalpie de combustion du charbon déterminée ainsi :

$$\Delta h_{Char} = (2 + \nu_{O_2}^S) (1 - \phi) \Delta h_{CO} + (1 + \nu_{O_2}^S) (2\phi - 1) \Delta h_{CO_2} \quad (\text{II.9})$$

Avec  $\Delta h_{CO} = 9$  MJ/kg et  $\Delta h_{CO_2} = 30$  MJ/kg qui représentent respectivement les enthalpies de combustions complète et incomplète du charbon. Ces enthalpies sont obtenues à partir de l'équation (II.4) en remplaçant  $\phi$  par 1 et 0 respectivement. Il est supposé que la chaleur dégagée lors de la combustion du charbon, soit absorbée à moitié par la phase gazeuse et l'autre moitié par la phase solide. Ainsi :  $\alpha_{SG} = 0,5$ .

En prenant en considération toutes les équations précédentes, l'évolution au cours du temps de chaque constituant ainsi que sa température dans chaque famille  $m$  sont déterminées par l'intermédiaire des relations suivantes [27,56,220] :

$$\frac{d}{dt} (\beta_S^m \rho_S^m Y_{H_2O}^m) = -\dot{\omega}_{Vap}^m \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{d}{dt} (\beta_S^m \rho_S^m Y_{Dry}^m) = -\dot{\omega}_{Pyr}^m \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{d}{dt} (\beta_S^m \rho_S^m Y_{Char}^m) = (\nu_{Char} - \nu_{Suies}) \dot{\omega}_{Pyr}^m - \dot{\omega}_{Char}^m \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\beta_S^m \rho_S^m) = & -\dot{\omega}_{Vap}^m - (1 - \nu_{Char} + \nu_{Suies}) \dot{\omega}_{Pyr}^m \\ & - \left(1 - \frac{\nu_{Cendre}}{\nu_{Char} - \nu_{Suies}}\right) \dot{\omega}_{Char}^m \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\beta_S^m) = & \frac{1}{\rho_S^m} \left[ -\dot{\omega}_{Vap}^m - \beta_S^m \frac{d}{dt} (\rho_S^m) \right]_{Vap} \\ & + \frac{1}{\rho_S^m} \left[ - \left(1 - \frac{\nu_{Cendre}}{\nu_{Char} - \nu_{Soot}}\right) \dot{\omega}_{Char}^m - \beta_S^m \frac{d}{dt} (\rho_S^m) \right]_{Comb} \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

$$\beta_S^m \rho_S^m C_S^m \frac{dT_S^m}{dt} = \dot{Q}_S^m - \dot{\omega}_{Vap}^m \Delta h_{Vap} - \dot{\omega}_{Pyr}^m \Delta h_{Pyr} + \alpha_{SG} \dot{\omega}_{Char}^m \Delta h_{Char} \quad (\text{II.15})$$

Où  $v_{Cendre}$  représente la masse de la cendre produite et  $C_s^m$  représente la capacité calorifique du combustible appartenant à la famille m.

Une particule du combustible solide reçoit de la chaleur par convection ainsi que par rayonnement. Cette quantité de chaleur est donnée par [27,56,220]:

$$\dot{Q}_s = h_s \beta_s s_s (T - T_s) + \frac{\beta_s s_s}{4} (J - 4BT_s^4) \quad (\text{II.16})$$

Où  $T$  représente la température du mélange gazeux,  $T_s$  la température du solide,  $J$  l'irradiance totale et  $B$  la constante de Boltzmann prise égale à  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ . Le coefficient d'échange convectif  $h_s$  dépend de la forme géométrique de la particule. Par exemple, pour une famille de végétation de type cylindrique,  $h_s$  est obtenue comme à partir de la formule :

$$Nu = \frac{h_s D}{\lambda} \quad (\text{II.17})$$

Avec  $\lambda$  la conductivité thermique du mélange gazeux et  $Nu$  le nombre de Nusselt calculé en prenant en considération les convection naturelle et forcée comme suit :

$$Nu = (Nu_{FC}^2 + Nu_{NC}^2)^{1/2} \quad (\text{II.18})$$

Où  $Nu_{FC}$  et  $Nu_{NC}$  représentent les nombres de Nusselt pour la convection respectivement forcée et normale. Ces grandeurs sont corrélées au nombre de Prandtl du mélange gazeux ainsi qu'aux nombres de Reynolds  $Re_D$  et de Rayleigh  $Ra_D$  déterminés suivant le diamètre  $D$  de la particule solide [226] :

$$Nu_{FC} = \begin{cases} (0,43 + 0,5Re_D^{0,5})Pr^{0,38} & \text{si } Re_D < 1300 \\ 0,25Re_D^{0,6}Pr^{0,38} & \text{si } Re_D > 1300 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$$Nu_{NC}^{1/2} = 0,6 + \frac{0,387Ra_D^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \quad (\text{II.20})$$

### **II.1.1.2 Modélisation de la phase gazeuse**

L'évolution temporelle du comportement de la phase gazeuse résultant de la dégradation de la végétation et les réactions de combustion, est modélisée par un ensemble d'équations

différentielles qui prennent en compte la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement du mélange gazeux. Étant donné que l'écoulement est transitoire et turbulent dans la plupart des zones du domaine comme c'est le cas, par exemple, au-dessus du front de feu ou autour de la flamme, ces équations sont filtrées à l'aide de la moyenne de Favre [227]. Elles sont résolues en utilisant l'approximation des faibles nombres de Mach [228]:

$$\frac{D\bar{\rho}}{Dt} = \sum_m \sum_{\alpha} \dot{M}_{\alpha}^m \quad (\text{II.21})$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\bar{\rho}\tilde{u}_i)}{Dt} = & -\frac{\partial\bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{\mu} \left( \frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial\tilde{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_i u'_j}) \\ & + (\bar{\rho} - \bar{\rho}_0) g_i - \sum_m F_{Di}^m \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\bar{\rho}\tilde{h})}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\bar{\mu}}{Pr} \frac{\partial\tilde{T}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_j h'}) + \frac{d\bar{P}_{th}}{dt} \\ & + (1 - \alpha_{SG}) \Delta h_{char} \sum_m \dot{\omega}_{char}^m + \sum_m \sum_{\alpha} \dot{M}_{\alpha}^m \bar{h}_{\alpha}^m \\ & - \sum_m \dot{Q}_{S,conv}^m + \beta_G \sigma_G (J - 4\sigma\tilde{T}^4) \end{aligned} \quad (\text{II.23})$$

$$\frac{D(\bar{\rho}\tilde{Y}_{\alpha})}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\bar{\mu}}{Sc} \frac{\partial\tilde{Y}_{\alpha}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_j Y'_{\alpha}}) + \bar{\omega}_{\alpha} + \sum_m \dot{M}_{\alpha}^m \quad (\text{II.24})$$

Dans ces équations,  $\rho_0$  représente la masse volumique initiale de la phase gazeuse stratifiée à cause de la gravité et  $g_i$  la composante de la gravité dans la direction  $i$ . La variable  $\phi$  désigne la masse volumique  $\rho$ , les composantes de vitesse  $u_i$ , l'enthalpie  $h$  et les fractions massiques  $Y_{\alpha}$  des différentes espèces chimiques (CO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, et N<sub>2</sub>). Elle est égale à la somme de sa valeur moyenne « au cours de temps » (RANS) mais également valeur "filtrée" (LES), et la fluctuation  $\phi = \bar{\phi} + \phi'$ . En revanche, la moyenne de Favre est définie par :  $\tilde{\phi} = \overline{\rho\phi}/\bar{\rho}$ . L'opérateur  $D/Dt$  est défini par :

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{u}_j\phi)}{\partial x_j} \quad (\text{II.25})$$

La masse volumique de la phase gazeuse est donnée par  $\rho = \beta_G \rho_G$  où  $\rho_G$  représente la masse volumique du mélange gazeux et  $\beta_G$  la fraction volumique de la phase gazeuse donnée par :

$$\beta_G = 1 - \sum_m \beta_S^m \quad (\text{II.26})$$

Avec  $\beta_S^m$  la fraction volumique de la famille «  $m$  » du combustible solide.

Dans la formulation du faible nombre de Mach [213], la pression du mélange gazeux est divisée suivant trois contributions : la pression dynamique  $P_G$  agissant pour équilibrer l'inertie et les forces externes variant dans le temps, la pression thermodynamique du gaz  $P_{thG}$  qui est spatialement homogène, et la pression hydrostatique du gaz  $P_{hsG}$  qui est indépendante du temps et équilibre la stratification initiale de la masse volumique :  $P = \alpha_G P_G$ ,  $P_{th} = \alpha_G P_{thG}$ , et  $P_{hs} = \alpha_G P_{hsG}$ .

Le mélange gazeux est considéré comme un gaz parfait. La masse volumique de la phase gazeuse est ainsi donnée par :

$$\bar{P}_{th} + \bar{P}_{hs} = \bar{\rho} (\sum_{\alpha} R_{\alpha} \bar{Y}_{\alpha}) \bar{T} \quad (\text{II.27})$$

Où  $R_{\alpha}$  représente la constante des gaz parfaits de l'espèce chimique  $\alpha$ .

La phase gazeuse est considérée comme un fluide Newtonien, caractérisé par une viscosité  $\mu = \alpha_G \mu_G$ , avec  $\mu_G$  la viscosité dynamique du mélange gazeux, obtenue à partir d'une combinaison linéaire pondérée par la fraction massique des viscosités dynamiques de chaque espèce chimique  $\mu_{\alpha}$ , dépendant de la température, suivant la loi de Sutherland :

$$\bar{\mu}_{\alpha} = \mu_{\alpha}^{ref} \left( \frac{\bar{T}}{T_{ref}} \right)^{1.5} \left( \frac{T_{ref} + S}{\bar{T} + S} \right) \quad (\text{II.28})$$

Avec  $T_{ref} = 273\text{K}$ ,  $S = 110,4\text{K}$ , et  $\mu_{\alpha}^{ref}$  les viscosités dynamiques de chaque espèce chimique  $\alpha$  à la température  $T_{ref}$ . Les nombres de Prandtl et Schmidt sont fixés à une valeur de 0,71. Le

terme  $F_{Di}^m$  représente la composante  $i$  de la force de traînée résultante de l'interaction dynamique entre le flux des gaz et la famille du combustible  $m$  :

$$F_{Di} = \bar{\rho} |\tilde{u}| \tilde{u}_i C_D a_L \quad (\text{II.29})$$

Où  $a_L = \beta_S S_S / 2$  représente le LAD « *leaf area density* » et  $C_D$  le coefficient de traînée obtenu à partir des corrélations dépendant de la forme des particules [226].

L'enthalpie  $h$  du mélange gazeux est obtenue à partir d'une combinaison linéaire pondérée par la fraction massique des enthalpies  $h_\alpha$  des espèces chimiques (CO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, et N<sub>2</sub>). La dépendance en température des enthalpies est donnée dans la base de données de l'outil de thermodynamique CHEMKIN [214].

Le terme  $\dot{Q}_{S,Conv}^m$  représente le taux de transfert de chaleur convectif entre le mélange gazeux et le combustible appartenant à la famille  $m$ , donné par le 1<sup>er</sup> terme de l'équation (II.16).  $\sigma_G$  représente le coefficient d'extinction radiatif du mélange gaz-suies [229].

La dégradation de la végétation dans chaque famille  $m$  résulte de la consommation d'O<sub>2</sub>, et de la production de CO, CO<sub>2</sub> ainsi que de l'H<sub>2</sub>O gazeux et les particules de suies et de charbon avec les taux de masse suivants :

$$\dot{M}_{O_2} = - v_{O_2}^S \phi \dot{\omega}_{Char} \quad (\text{II.30})$$

$$\dot{M}_{CO} = (1 - v_{Char} - v_{CO_2}) \dot{\omega}_{Pyr} + (2 + v_{O_2}^S) (1 - \phi) \dot{\omega}_{Char} \quad (\text{II.31})$$

$$\dot{M}_{CO_2} = v_{CO_2} \dot{\omega}_{Pyr} + (1 + v_{O_2}^S) (2\phi - 1) \dot{\omega}_{Char} \quad (\text{II.32})$$

$$\dot{M}_{H_2O} = \dot{\omega}_{vap} \quad (\text{II.33})$$

$$\dot{M}_{Soot} = v_{Soot} \dot{\omega}_{Pyr} \quad (\text{II.34})$$

Enfin et pour clore cette partie,  $\bar{\omega}_\alpha$  représente le taux de production ou de destruction des espèces chimiques  $\alpha$  résultant de la combustion en phase gazeuse. Un complément plus détaillé sera donné dans la partie décrivant la modélisation de la combustion.

### II.1.1.3 Modélisation de la turbulence

Deux modèles de turbulence sont implémentés dans FireStar : l'approche (URANS) « *Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes* » basée sur un modèle à 2 équations à savoir le modèle ( $k - \varepsilon$ ), ainsi que l'approche (LES) « *Large Eddy Simulation* ».

#### II.1.1.3.1 Modèle de turbulence RNG ( $k - \varepsilon$ )

Le modèle de turbulence RNG ( $k - \varepsilon$ ) est une version améliorée du modèle de turbulence  $k$ -epsilon. Il a été développé pour mieux prendre en compte les effets de la turbulence à haute vitesse et pour améliorer la précision des prévisions dans les écoulements turbulents complexes. Les corrélations doubles représentant l'action des fluctuations sur les équations de transport moyennes sont évaluées à l'aide du concept de viscosité turbulente « *Eddy viscosity* » [216] et le gradient de diffusion généralisé des quantités scalaires  $\phi$  :

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_T \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \mu_T \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} + \bar{\rho} k \right) \delta_{ij} \quad (\text{II.35})$$

$$-\overline{\rho u_i' \phi'} = \mu_T \alpha_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \quad (\text{II.36})$$

La viscosité turbulente  $\mu_T$  est évaluée à partir de l'énergie cinétique turbulente  $k$  et son taux de dissipation  $\varepsilon$ . Une version adaptée du modèle de turbulence RNG  $k$ - $\varepsilon$  pour un nombre de Reynolds élevé est également utilisée, ce qui permet de mieux représenter les caractéristiques de l'écoulement turbulent et de mieux prédire les phénomènes de turbulence [217] :

$$\mu_T = f_\mu \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.37})$$

Avec  $C_\mu = 0,085$  et  $f_\mu$  est une fonction d'amortissement donnée par la relation :

$$\ln(f_\mu) = - \frac{3.4}{\left(1 + \frac{Re_T}{50}\right)^2} \quad (\text{II.38})$$

$Re_T = \bar{\rho} k^2 / \mu \varepsilon$  représente le nombre de Reynolds turbulent. Le calcul des champs turbulents,  $k$  et  $\varepsilon$ , repose sur la résolution de deux équations de transport :

$$\begin{aligned} \frac{D(\bar{\rho}k)}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_e \alpha_T \left( \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right) + P_k + W_k - \bar{\rho} \varepsilon \\ & + \frac{1}{2} \bar{\rho} |\tilde{u}| \sum_m C_D^m \beta_S^m s_S^m (C_{Pw} |\tilde{u}|^2 - C_{\varepsilon w} k) \end{aligned} \quad (\text{II.39})$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\bar{\rho}\varepsilon)}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_e \alpha_T \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \right) + C_{1\varepsilon} \left( \frac{P_k}{\tau} + C_{3\varepsilon} \frac{W_k}{\tau} \right) + (C_{2\varepsilon} + R) \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{\tau} \\ & + \frac{1}{2} \bar{\rho} |\tilde{u}| \sum_m C_D^m \beta_S^m s_S^m \left( C_{P\varepsilon w} |\tilde{u}|^2 \frac{\varepsilon}{k} - C_{D\varepsilon w} \varepsilon \right) \end{aligned} \quad (\text{II.40})$$

La viscosité effective  $\mu_e = \mu_T + \bar{\mu}$ ,  $P_k$  et  $W_k$  représentent les termes contribuant à la production de la turbulence due respectivement au cisaillement et à la flottabilité [216]:

$$P_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad \text{et} \quad W_k = \frac{\mu_t}{\bar{\rho}} \alpha_T \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} g_j \quad (\text{II.41})$$

L'inverse du nombre de Prandtl effectif ( $\alpha$ ) est calculé en résolvant l'équation (II.42) obtenue analytiquement à partir de la théorie RNG, avec  $\alpha_0 = 1$  pour  $\alpha = \alpha_T$ , and  $\alpha_0 = 1/\text{Pr}$  pour  $\alpha = \alpha_\phi$ .

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\bar{\mu}}{\mu_e} \quad (\text{II.42})$$

Concernant l'équation de transport de  $\varepsilon$  (Eq. II.40),  $\tau$  représente le maximum entre l'échelle de temps de turbulence ( $k/\varepsilon$ ) et  $6\tau_\eta$ , où  $\tau_\eta = (\bar{\mu}/\bar{\rho}\varepsilon)^{1/2}$  désigne l'échelle de temps de Kolmogorov associée aux mouvements les plus petits et les plus rapides, dans un fluide turbulent.

Le terme source  $R$ , résultant de la théorie RNG [217], permet d'améliorer les prédictions du modèle dans des zones où l'écoulement turbulent n'est ni homogène, ni isotrope. C'est notamment le cas dans les zones faiblement turbulentes telles que, par exemple, à proximité des bords du domaine (frontières fluides). Il est calculé comme suivant :

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (\text{II.43})$$

Avec  $\eta = (P_k/C_\mu \bar{\rho} \varepsilon)^{1/2}$ ,  $\eta_0 = 4,38$  et  $\beta = 0,012$ .

Les termes comportant le coefficient de traînée  $C_D$  dans les équations (II.39) et (II.40), permettent de prendre en compte la contribution de la force de traînée induite par la végétation, dans le bilan de l'énergie cinétique turbulente. Les valeurs des constantes utilisées sont données par [230]:  $C_{P\varepsilon} = 0,8$ ,  $C_{\varepsilon w} = 4$ ,  $C_{P\varepsilon w} = 1,5$ , et  $C_{D\varepsilon w} = 3,24$ .

D'autres constantes figurent dans ce modèle [216] :  $C_{1\varepsilon} = 1,42$  and  $C_{2\varepsilon} = 1,68$ . Le degré auquel  $\varepsilon$  est affecté par la flottabilité est déterminé par la constante  $C_{3\varepsilon}$  :

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \frac{|\tilde{u}_j g_j|}{\sqrt{|\tilde{u}_j \tilde{u}_j| g^2 - (\tilde{u}_j g_j)^2}} \quad (\text{II.44})$$

#### II.1.1.3.2 Modèle « Sub-Grid-Scale » (LES)

Le modèle de turbulence LES (Large Eddy Simulation) est une approche de simulation numérique des écoulements turbulents qui consiste à résoudre les structures de grande échelle. Les structures de petite échelle, qui sont en dessous de la résolution du maillage, sont modélisées à l'aide d'un modèle de sous-maillages « *Sub-Grid-Scale* » prenant en compte l'effet de ces structures sur les grandeurs moyennes de l'écoulement. À l'instar du modèle précédent, cette approche emploie également le concept de la viscosité turbulente « *Eddy viscosity* » [216] pour décrire le comportement complexe de l'écoulement turbulent. La viscosité turbulente  $\mu_T$  ou viscosité à l'échelle de la maille inférieure  $\mu_{SGS}$  est calculée comme suit :

$$\mu_T = \mu_{SGS} = \rho C'_{SGS} L_{SGS} \sqrt{k_{SGS}} \quad (\text{II.45})$$

$L_{SGS}$  représente la largeur de coupure de filtre calculée à partir du volume de contrôle d'une cellule déterminant la plus petite échelle de turbulence qui peut être résolue par le filtre de sous-maille et, par conséquent, la précision de la simulation numérique. Cette largeur est calculée comme suit :

$$L_{SGS} = V^{1/3} = (\Delta_X \cdot \Delta_Y \cdot \Delta_Z)^{1/3} \quad (\text{II.46})$$

Où  $\Delta_x, \Delta_y$  et  $\Delta_z$  représentent les dimensions des mailles dans les directions, X, Y et Z respectivement. L'énergie cinétique de turbulence associée à échelle  $k_{SGS}$  est calculée en résolvant l'équation de transport :

$$\begin{aligned} \frac{D(\bar{\rho}k_{SGS})}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{SGS} \alpha_T \left( \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_j} \right) \right) + P_k + W_k - \bar{\rho} C_\varepsilon \frac{k_{SGS}^{3/2}}{L_{SGS}} \\ & + \frac{1}{2} \bar{\rho} |\tilde{u}| \sum_m C_D^m \beta_S^m s_S^m (C_{Pw} |\tilde{u}|^2 - C_{\varepsilon w} k_{SGS}) \end{aligned} \quad (II.47)$$

Ainsi, le taux de dissipation  $\varepsilon_{SGS}$  est calculé comme suit :

$$\varepsilon_{SGS} = C_\varepsilon \frac{k_{SGS}^{3/2}}{L_{SGS}} \quad (II.48)$$

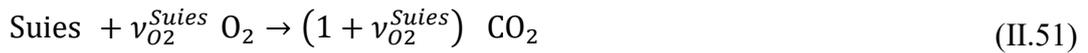
Dans les équations précédentes,  $C'_{SGS} = 0,07$  et  $C_\varepsilon = 0,93$  représentent les constantes du modèle [231].  $P_k$  et  $W_k$  sont calculés à l'aide de l'équation (II.41).  $\alpha_T$ , qui représente l'inverse du nombre de Prandtl effectif, a pour expression :

$$\alpha_\phi = \alpha_T = \frac{1}{Pr_{SGS}} \quad (II.49)$$

Où  $Pr_{SGS} = 0,85$ . Les constantes utilisées dans les termes déterminant la force de traînée induite par la végétation sont  $C_{Pw} = 0,8$  et  $C_{\varepsilon w} = 4$  [230].

#### II.1.1.4 Modélisation de la combustion

Pour 1 kg de combustible, les produits de pyrolyse issus de la dégradation de la végétation (gaz CO et suies) dans la zone proche du front de flammes, réagissent avec l'air ambiant pour produire du CO<sub>2</sub> suivant les réactions de combustion ci-dessous :



Où  $\nu_{O_2}^G = 4/7$  et  $\nu_{O_2}^{Suies} = 8/3$  sont les coefficients stœchiométriques.

Le taux de combustion de CO est lié à deux facteurs : la fraction massique des espèces chimiques et le temps nécessaire au mélange de l'air ambiant avec les gaz de pyrolyse. Il peut être évalué en suivant la loi d'Arrhenius [215,232] :

$$\bar{\omega}_{CO}^{Ar} = \bar{\rho}^2 \bar{Y}_{CO} \bar{Y}_{O_2} K_{Ar} \exp\left(-\frac{E_{Ar}}{R_0 \bar{T}}\right) \quad (\text{II.52})$$

Avec  $K_{Ar} = 7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}$  et  $\frac{E_{Ar}}{R_0} = 8000 \text{ K}$  représentant l'énergie d'activation.

De plus, ce mélange ne peut se produire que si l'écoulement est totalement turbulent, c'est-à-dire qu'en présence de tourbillons localisés dans la zone du front de flammes. Le taux de combustion suit le concept EDC (*Eddy Dissipation Concept*) [215,233] :

$$\bar{\omega}_{CO}^{EDC} = \frac{C_A \bar{\rho}}{\tau_{mix}} \text{Min} \left( \bar{Y}_{CO}, \frac{\bar{Y}_{O_2}}{\nu_{O_2}^G} \right) \quad (\text{II.53})$$

$\tau_{mix}$  représente le maximum entre l'échelle de temps de turbulence ( $k/\varepsilon$ ) et  $6\tau_\eta$ .  $C_A$  est une constante qui dépend du nombre de Reynolds turbulent [215] :

$$C_A = -\frac{23.6}{Re_T^{1/4}} \frac{\chi}{(1 - \chi\gamma)} \quad (\text{II.54})$$

$\gamma$  représente la fraction volumique des structures turbulentes de petites échelles et  $\chi$  la fraction occupée par la réaction à l'intérieur de ces structures :

$$\gamma = \frac{9.7}{Re_T^{1/4}} \quad \chi = \frac{Re_T^{1/4}}{2.13} \frac{\bar{Y}_{CO_2}/(1+\nu_{O_2}^G)}{\bar{Y}_{CO} + \bar{Y}_{CO_2}/(1+\nu_{O_2}^G)} \quad (\text{II.55})$$

Le taux de réaction du CO est donné, quant à lui, par la relation suivante :

$$\bar{\omega}_{CO} = -\text{Min} (\bar{\omega}_{CO}^{Ar}, \bar{\omega}_{CO}^{EDC}) \quad (\text{II.56})$$

En effet, le taux de consommation de  $O_2$  résultant de la combustion de CO est  $\bar{\omega}_{O_2}^G = \nu_{O_2}^G \bar{\omega}_{CO}$  et celui de la production de  $CO_2$  est :  $\bar{\omega}_{CO_2}^G = -(1 + \nu_{O_2}^G) \bar{\omega}_{CO}$ .

Concernant les suies, leur taux de production est limité à la phase de pyrolyse [198]. Ces particules sont assimilées à des sphères de carbone de diamètre  $d_{soot} = 1 \mu\text{m}$  ayant une densité  $\rho_{soot} = 1800 \text{ kg m}^{-3}$  et une fraction volumique calculée suivant une équation de transport [234,235] :

$$\frac{D(\bar{\rho}\bar{f}_v)}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_j^{th} f_v}) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_j' f_v'}) + \frac{\bar{\rho}}{\rho_{Suies}} \left( \sum_m \dot{M}_{Suies}^m - \bar{\omega}_{Suies} \right) \quad (\text{II.57})$$

Le gradient de température favorise le transport des particules de suies par convection suivant une vitesse thermo phorétique  $\tilde{u}_j^{th}$  définie par :

$$\bar{u}_j^{th} = -0.54 \frac{\bar{\mu}}{\bar{\rho}} \frac{\partial(\ln \bar{T})}{\partial x_j} \quad (\text{II.58})$$

Le terme  $\bar{\omega}_{Suies}$  est évalué à partir de l'oxydation du graphite pyrolytique en présence de l'oxygène de l'air comme suivant [236]:

$$\bar{\omega}_{Suies} = 12 \tilde{f}_v s_{Suies} \left[ \frac{k_A \bar{P}_{O_2}}{1 + k_z \bar{P}_{O_2}} \zeta + k_B \bar{P}_{O_2} (1 - \zeta) \right] \text{ et } \zeta = \left( 1 + \frac{k_T}{k_B \bar{P}_{O_2}} \right)^{-1} \quad (\text{II.59})$$

Avec  $s_{Suies} = 6/d_{suies}$  le rapport surface / volume des particules de suies et  $\bar{P}_{O_2}$  la pression partielle de l'oxygène.  $k_A$ ,  $k_B$ ,  $k_T$ , et  $k_z$  représentent les différents taux de réaction dépendant de la température [236] :

$$\begin{aligned} k_A &= 200 \exp(-30000/R_0 \tilde{T}) \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm} \\ k_B &= 4.46 \times 10^{-2} \exp(-15200/R_0 \tilde{T}) \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm} \\ k_T &= 1.51 \times 10^6 \exp(-97000/R_0 \tilde{T}) \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm} \\ k_z &= 21.3 \exp(4100/R_0 \bar{T}) \text{ atm}^{-1} \end{aligned} \quad (\text{II.60})$$

Les taux de consommation de  $O_2$  et de production de  $CO_2$  résultant de l'oxydation des suies sont donnés par :  $\bar{\omega}_{O_2}^{Soot} = -v_{O_2}^{Soot} \bar{\omega}_{Soot}$  et :  $\bar{\omega}_{CO_2}^{Soot} = (1 + v_{O_2}^{Soot}) \bar{\omega}_{CO}$

### II.1.1.5 Modèle d'interaction turbulence-rayonnement

Le rayonnement est un mode de transfert de chaleur important qui joue un rôle majeur, lors de la propagation d'un incendie. En effet, il représente au moins 30% de l'énergie dégagée par le feu et reçu par la végétation située devant le front de flammes [61]. Le rayonnement est émis par les particules de suies présentes dans la flamme mais également par les braises situées en amont du front de flammes. L'irradiance totale est calculée par l'intégrale suivante :

$$J = \int_0^{4\pi} I \, d\Omega \quad (\text{II.61})$$

L'intensité radiative  $I$ , suivant un chemin optique  $S$ , est évaluée en résolvant l'équation de transfert radiatif (ETR) :

$$\frac{d\beta_G \bar{I}}{dS} = \beta_G \left( \frac{B \bar{s}_G \bar{T}^4}{\pi} - \bar{s}_G \bar{I} \right) + \frac{\beta_S^m s_S^m}{4} \left( \frac{B (T_S^m)^4}{\pi} - \bar{I} \right) \quad (\text{II.62})$$

Avec  $\beta_G$  représentant la fraction volumique de la phase gazeuse et  $s_G$  le coefficient d'absorption fonction du taux des produits de combustion ( $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ), de la température du mélange gazeux ( $\bar{T}$ ) et de la fraction volumique des suies ( $\bar{f}_v$ ) [233] comme suivant :

$$s_G = 0.1 (\bar{X}_{\text{CO}_2} + \bar{X}_{\text{H}_2\text{O}}) + 1862 \bar{f}_v \bar{T} \quad (\text{II.63})$$

$\bar{X}_{\text{CO}_2}$  et  $\bar{X}_{\text{H}_2\text{O}}$  représentent les fractions molaires respectivement du  $\text{CO}_2$  et de l' $\text{H}_2\text{O}$ .

Suivant [237], le terme  $\bar{s}_G \bar{T}^4$  dans l'Eq. (II.63), est développé selon l'Eq. (II.64), où  $\partial \sigma_a / \partial T = 1862 \bar{f}_v$ .

$$\overline{s_G T^4} \approx \bar{s}_G \bar{T}^4 \left[ 1 + 6 \frac{\overline{T'^2}}{\bar{T}^2} + 4 \frac{\overline{s'_G T'}}{\bar{s}_G \bar{T}} \right] = \bar{s}_G \bar{T}^4 \left[ 1 + 6 \frac{\overline{T'^2}}{\bar{T}^2} + 4 \frac{\overline{T'^2}}{\bar{s}_G \bar{T}} \frac{\partial s_G}{\partial T} \right] \quad (\text{II.64})$$

En utilisant le modèle de diffusivité des tourbillons isotropes, également connu sous le nom d'hypothèse de diffusion de gradient simple [238], la variance des fluctuations de température  $\theta = \overline{T'^2}$  est obtenue à partir de l'équation (II.65) :

$$\frac{D(\bar{\rho}\theta)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + 2 \frac{\mu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right)^2 - 2\rho C_\varepsilon \frac{\sqrt{k_{SGS}}}{L_{SGS}} \theta \quad (\text{II.65})$$

Le dernier terme de l'équation (II.65) est initialement égal à  $-2\rho\varepsilon_\theta$ , où  $\varepsilon_\theta$  représente le taux de dissipation de la variance des fluctuations de température. Cependant, au lieu d'utiliser une équation de transport pour  $\varepsilon_\theta$ , son champ est obtenu en supposant un rapport constant, égal à 0,5 [238], entre l'échelle de temps  $\theta/2\varepsilon_\theta$  de la dissipation de la fluctuation de température et l'échelle de temps  $L_{SGS}/C_\varepsilon\sqrt{k_{SGS}}$  de la dissipation de l'énergie cinétique turbulente. Cela est également plus cohérent avec le modèle LES, où aucune équation de transport n'est utilisée pour le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente à sous-maille. La prise en compte des fluctuations de température dans l'équation RTE se traduit par une modification du terme source  $s_G \bar{T}^4$  dans l'équation (II.62), en le multipliant par le facteur  $(1 + 6\theta/\bar{T}^2 + 7448 \theta \bar{f}_v / \bar{s}_G \bar{T})$ .

Cela conduit à une augmentation significative de l'intensité du rayonnement dans les régions fortement turbulentes.

## II.1.2 Méthodes numériques employées

### II.1.2.1 Maillage des phases solide et gazeuse

Les équations de transport (Eqs. II.21- II.24), avec les différents modèles de turbulence implémentés dans FireStar (Eqs. II.39, II.40 et II.47), forment un système d'équations aux dérivées partielles résolu dans un repère cartésien, en faisant appel à la méthode des volumes finis. Le domaine de calcul est subdivisé en un certain nombre de cellules à l'aide d'un maillage raffiné au niveau des parois, comme le montre la figure (II-3) [57].

Le dimensionnement des mailles ( $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ ) est étroitement lié à la longueur d'extinction du feu via la relation ci-dessous :

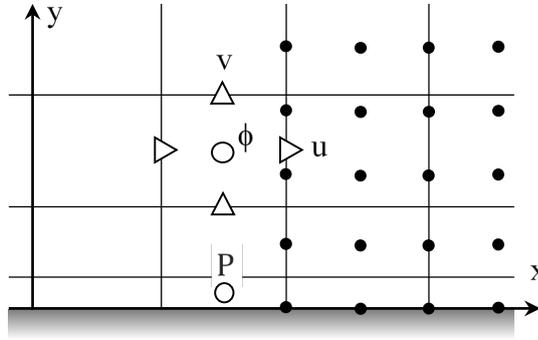
$$\text{Max} (\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z) < \frac{4}{\sum_m \beta_S^m s_S^m} \quad (\text{II.66})$$

où  $\beta_S^m s_S^m / 4$  est le coefficient d'extinction dans le couvert végétal correspondant à chaque famille de végétal d'indice  $m$ . Cette contrainte est plus particulièrement importante pour les régimes où la propagation est pilotée par la flamme. En effet, dans ce cas particulier, le rayonnement représente le principal mode de transfert de chaleur.

Concernant la phase gazeuse, l'emplacement des variables de cette phase est décalé : les variables scalaires sont stockées au centre des cellules tandis que les composantes de la vitesse sont définies aux centres des faces des cellules. Cette technique permet d'éviter les champs de pression en zigzag [227,233].

Concernant la phase solide, son domaine est caractérisé par un maillage rectangulaire uniforme dont la taille des mailles ( $\Delta_x^S, \Delta_y^S, \Delta_z^S$ ) respecte aussi le critère de dimensionnement évoqué dans l'équation (II.66). Les équations (II.10-II.15) sont résolues séparément sur ce maillage pour chaque famille végétal  $m$  et pour chaque élément du combustible.

Finalement, l'interaction entre les phases solide et gazeuse nécessite l'estimation des variables d'une de ces deux phases sur les points de la grille de l'autre phase, en utilisant une simple interpolation linéaire.



**Figure II-3.** Structuration des maillages de la phase gazeuse (—) et celui de la phase solide (•) dans le plan  $xy$ , avec les positions décalées des variables dans la phases gazeuse (variables scalaires  $\phi$  et composantes de vitesses  $u$  et  $v$ )

### II.1.2.2 Résolution dans le temps des équations de transport

Les équations de convection-diffusion de la phase gazeuse (Eqs. II.21-II.24, II.39, II.40, II.47 et II.57) peuvent être écrites sous la forme :

$$\frac{\partial \bar{\rho}\bar{\phi}}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\bar{\rho}\vec{v}\bar{\phi}) = \vec{v} \cdot (\Gamma_{\phi}\vec{v}\bar{\phi}) + S_{\phi} \quad (\text{II.67})$$

Avec  $\phi$  une variable générale,  $\vec{V}$  le vecteur vitesse de l'écoulement,  $\Gamma_{\phi}$  le coefficient de diffusion et  $S_{\phi}$  un terme source.

Le schéma temporel est entièrement implicite, ce qui confère à la méthode de résolution une stabilité non conditionnelle en ce qui concerne le pas de temps. Le terme transitoire ( $\frac{\partial \bar{\rho}\bar{\phi}}{\partial t}$ ) dans l'équation (II.67), est estimé selon le schéma de temps d'Euler du troisième ordre, d'où la discrétisation à l'instant  $t_n$  :

$$\begin{aligned} C_0(\bar{\rho}\bar{\phi})^n + C_1(\bar{\rho}\bar{\phi})^{n-1} + C_2(\bar{\rho}\bar{\phi})^{n-2} + C_3(\bar{\rho}\bar{\phi})^{n-3} + \vec{v} \cdot (\bar{\rho}\vec{v}\bar{\phi})^n \\ = \vec{v} \cdot (\Gamma_{\phi}\vec{v}\bar{\phi})^n + S_{\phi}^n \end{aligned} \quad (\text{II.68})$$

Pour un pas de temps fixe, les valeurs des coefficients  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , et  $C_3$  sont respectivement :  $11/6dt$ ,  $-3/dt$ ,  $3/2dt$ , et  $-1/3dt$ .

Pour une incrémentation avec un pas de temps variable, ces constantes sont données

par :

$$\begin{aligned}
C_0 &= \frac{dt_{n-1}^2 + dt_{n-1} dt_{n-2} + 4 dt_n dt_{n-1} + 2 dt_n dt_{n-2} + 3 dt_n^2}{dt_n (dt_{n-1}^2 + dt_{n-1} dt_{n-2} + 2 dt_n dt_{n-1} + dt_n dt_{n-2} + dt_n^2)} \\
C_1 &= -\frac{dt_{n-1}^2 + dt_{n-1} dt_{n-2} + 2 dt_n dt_{n-1} + dt_n dt_{n-2} + dt_n^2}{dt_n dt_{n-1} (dt_{n-1} + dt_{n-2})} \\
C_2 &= \frac{dt_n (dt_n + dt_{n-1} + dt_{n-2})}{dt_{n-1} dt_{n-2} (dt_n + dt_{n-1})} \\
C_3 &= -\frac{dt_n (dt_n + dt_{n-1})}{dt_{n-2} (dt_{n-2}^2 + dt_n dt_{n-2} + dt_{n-1}^2 + dt_n dt_{n-1} + 2 dt_{n-1} dt_{n-2})}
\end{aligned} \tag{II.69}$$

Les pas d'incrément  $dt_i = t_i - t_{i-1}$  sont obtenus à partir d'un algorithme de pas de temps adaptatif basé sur l'estimation de l'erreur de troncature associée au schéma d'intégration temporelle [239].

Au début du pas de temps  $t_n$ , une solution prédite de l'équation (II.67) est obtenue à l'aide d'une méthode d'Euler explicite du troisième ordre, peu coûteuse en termes de calcul. Cette solution prédite est utilisée comme condition initiale pour le pas de temps, et la correction est calculée en utilisant les itérations non linéaires associées à l'algorithme implicite. La norme de la différence entre les solutions prédites et corrigées sous forme normalisée, est utilisée comme mesure de l'erreur de troncature  $E(t_n)$  à l'instant  $t_n$ . L'incrément de temps  $dt_{n+1}$  est ensuite ajusté en comparant l'erreur de troncature avec le niveau de précision souhaité  $E_d$  (généralement entre  $10^{-4}$  et  $10^{-2}$ ) selon l'équation (II.70) [239], où  $TO$  est l'ordre du schéma temporel ( $TO = 3$  dans ce cas).

$$\frac{dt_{n+1}}{dt_n} = \left( \frac{E_d}{E(t_n)} \right)^{\frac{1}{TO+1}} = SFAC \tag{II.70}$$

Si le facteur de changement de pas de temps  $SFAC > 1$ , le prochain incrément de temps est augmenté de  $SFAC$ , et si  $SFAC < 1$ , il est réduit de  $SFAC$ . Cependant,  $SFAC$  est limité entre 0,5 et 1,2 pour éviter tout dépassement de la solution à  $t_{n+1}$ , et l'incrément de temps lui-même est également limité entre des valeurs minimales et maximales prédéfinies.

### II.1.2.3 Schéma de convection

Le schéma QUICK d'ordre 3 [240] est utilisé afin de réaliser l'interpolation de la valeur d'une variable sur une face d'un volume de contrôle. Comme le montre la (figure II-4), on suppose un flux convectif positif sur la face w ( $u_w > 0$ ), la valeur du scalaire  $\phi_w$  est donnée par :

$$\phi_w = \frac{B_1}{B} \phi_W + \frac{B_2}{B} \phi_P + \frac{B_3}{B} \phi_{WW} \quad (\text{II.71})$$

Avec  $B_1 = \delta x_2 \delta x_3 (\delta x_2 + \delta x_3)$ ,  $B_2 = \delta x_1 \delta x_3 (\delta x_3 - \delta x_1)$ ,  $B_3 = -\delta x_1 \delta x_2 (\delta x_1 + \delta x_2)$ , et  $B = B_1 + B_2 + B_3$ . Pour un maillage uniforme :  $B_1/B = 6/8$ ,  $B_2/B = 3/8$ , and  $B_3/B = -1/8$ .

Dans le cas d'un flux convectif négatif ( $u_w < 0$ ), le schéma de convection QUICK peut présenter une certaine instabilité numérique due à l'existence de coefficients négatifs dans la forme discrétisée des équations de transport [236]. Afin d'éviter ce problème, ces coefficients négatifs sont placés dans le terme source selon la formulation de Hayase *et al.* [241].

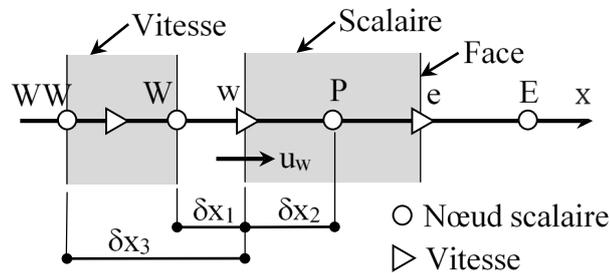


Figure II-4. Structure du maillage de la phase gazeuse avec les différentes notations dans la direction  $x > 0$

### II.1.2.4 Algorithme de résolution

Les variables des phases solide et gazeuse sont initialisées et les conditions initiales sont imposées à ( $t = 0$ ). Si les variables à un instants  $t_{n-1}$  sont considérées, la solution pour un instant  $t_n = t_{n-1} + dt_n$  est obtenue après une suite d'itérations dont la séquence de calcul est :

1. Détermination des fractions des différents composants chimiques ( $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ) en utilisant l'équation (II.15).

2. Détermination de la fraction volumique des suies (Eq. II.57).
3. Détermination de l'irradiance totale en résolvant l'équation de transport radiative (Eq. II.62) par la méthode des ordonnées Discrètes [242]. Celle-ci consiste à décomposer l'intensité radiative suivant un nombre fini de directions. Les méthodes  $S_8$ ,  $S_{10}$  ou bien  $S_{12}$  sont les plus utilisées et sont implémentées dans le code.
4. Résolution des équations de conservation (Eqs. II.10-II.15) qui décrivent l'évolution de la phase solide à l'aide de la méthode Runge-Kutta d'ordre (RK4).
5. Détermination des propriétés thermiques et physiques par la résolution de l'équation (II.23) qui permet d'obtenir les champs de températures en utilisant les données (CHEMKIN).
6. Les champs d'énergie cinétique turbulente  $k$  et son taux de dissipation  $\varepsilon$  sont obtenus à partir des équations (II.39) et (II.40) dans le cas du modèle  $k$ - $\varepsilon$  et des équations (II.47) et (II.48) dans le cas du modèle LES.
7. Détermination des champs de vitesse et de pression en résolvant les équations de Navier-Stokes. Le couplage entre la vitesse et la pression est réalisé à partir de l'algorithme PISO [236].

À la fin de chaque itération, les résidus de toutes les équations de transport sont calculés sous forme normalisée ou non normalisée. La convergence globale est considérée comme atteinte lorsque les normes  $L_2$  de tous les résidus atteignent des valeurs d'arrêt prédéfinies :  $10^{-5}$  pour la forme normalisée et  $10^{-4}$  pour la forme non normalisée. Cependant, le pas de temps  $t_n$  est répété avec un incrément de temps  $dt_n/2$  si l'une des situations suivantes se produit : (i) les deux critères d'arrêt (forme normalisée et forme non normalisée) ne sont pas satisfaits après un nombre maximum prédéfini d'itérations (généralement 30 itérations), (ii) la plus grande norme  $L_2$  de tous les résidus d'équations (soit en forme normalisée, soit en forme non normalisée) a augmenté de manière constante d'un facteur de 10 au cours de deux itérations consécutives, (iii)

l'augmentation de la température à un nœud quelconque de la phase fluide dépasse, à la convergence, une valeur maximale prédéfinie (généralement 200 K).

Les systèmes linéaires résultant de la discrétisation spatiale des équations de transport des variables de la phase fluide sont résolus à l'aide de méthodes itératives [243]. L'équation de pression symétrique est résolue en utilisant une méthode de gradient conjugué avec un préconditionneur LU modifié implicite (MILU) [56], tandis que le bi-gradient conjugué stabilisé avec un préconditionneur Jacobi est utilisé pour les autres équations de transport non symétriques. Le solveur est écrit en Fortran 95, parallélisé et optimisé à l'aide des directives OpenMP et des directives HMPP [56] et est opérationnel sur des plates-formes de calcul haute performance.

## **II.2 Modélisation physique simplifiée**

De nombreux outils opérationnels sont utilisés pour prédire le comportement des feux de forêt. Ces outils sont, pour la plupart, basés sur des modèles empiriques comme celui utilisé par les opérationnels en Australie en se basant sur le modèle de Mc Arthur pour les feux de prairies [192]. D'autres, utilisent des modèles semi-empiriques comme le modèle de Rothermel [42] qui est le cœur théorique du simulateur BEHAVE [244]. Malgré le temps de calcul réduit et l'efficacité de ces modèles, dans les conditions similaires à celles adoptées pour leur conception, leur utilisation dans un cadre différent et plus large peut engendrer des prédictions erronées. L'utilisation des modèles empiriques ou semi-empirique peut donc s'avérer délicate dans le contexte de prise de décisions, et de la mise en œuvre des politiques d'aménagement du territoire. La mise à disposition des modèles totalement prédictifs capables de fournir des résultats robustes quel que soient les conditions de propagations (environnementales, topographiques ou liées au couvert végétal), s'avère donc très importante pour la conception d'outils opérationnels, et sera un enjeu majeur pour les années à venir.

Le modèle dénommé modèle de Balbi proposé en 2007 par les chercheurs de l'Université de Corse Pasquale Paoli, est un modèle basé sur une approche physique simplifiée. Cette approche tient compte des équations qui gouvernent la propagation d'un feu afin de fournir la vitesse pour chaque point du front de flammes avec d'autres caractéristiques géométriques. Ce modèle simple, complet et plus rapide que le temps réel, avait été testé initialement sur plusieurs feux de litières à l'échelle de laboratoire. Dans ses premières versions, ce modèle ne considérait qu'un transfert de chaleur purement radiatif et utilisait des paramètres variant selon l'expérience [201,203]. Depuis, plusieurs améliorations ont été réalisées. C'est ainsi que le transfert de chaleur convectif est maintenant pris en compte et que les paramètres du modèle sont désormais universels, c'est-à-dire qu'ils ne changent pas de valeur en passant d'une expérience à une autre. Le modèle est donc maintenant totalement prédictif et lui permet de prédire correctement la plupart des configurations de laboratoire dans lesquelles la convection est le mode dominant de transfert de chaleur [200]. En 2020, le modèle de Balbi a été testé sur 357 feux de litières à l'échelle du laboratoire [204]. L'étude a pu montrer que l'erreur entre les résultats théoriques et expérimentaux était inférieure à 0,08 (Erreur quadratique moyenne normalisée) pour ces expériences. Dans sa dernière version [205], le modèle a encore été amélioré pour tenir compte des caractéristiques des feux à l'échelle du terrain. À cette échelle les dimensions de la strate végétale (surtout la hauteur) sont plus grandes, et le combustible de type arbuste est formé des particules mortes et vivantes. Ce dernier point s'avère être une différence importante entre un feu réel à l'échelle du terrain et un feu expérimental à échelle réduite sur du combustible coupé, souvent de type litière. Ce modèle a été comparé à des feux expérimentaux menés à l'échelle du terrain dans différentes régions du monde comme l'Espagne, le Portugal, la Turquie, l'Australie, La Nouvelle-Zélande ou les États-Unis, avec des résultats très convaincants. Dans la partie suivante les principales étapes qui ont permis de concevoir ce modèle sont décrites.

## II.2.1 Description du modèle de Balbi

Afin de pouvoir prédire correctement des feux à l'échelle du terrain qui se propagent sur de la végétation arbustive, des modifications ont donc été apportées à la version du modèle de Balbi publiée en 2020. Cependant, des hypothèses adoptées dans les anciennes versions du modèle [200,204] ont été maintenues. Ainsi, le modèle considère toujours que même si l'effet de la turbulence d'un flux de gaz au voisinage d'un front de flammes est variable, son effet sur la propagation peut être représenté par un écoulement moyen équivalent à un régime permanent [200]. La zone de combustion est divisée en deux parties principales (figure II-5). La base de la flamme délimitée par les points  $ABB_0A_0$  représente la zone de combustible brûlés où les gaz de pyrolyse se mélangent avec l'air frais en amont du front. Ce mélange d'air avec les gaz de pyrolyse de la couche inférieure passe à travers le front de flammes et crée une zone de combustion en contact direct avec le combustible non brûlé. Une autre partie du mélange gaz chauds-air frais est entraînée par une accélération ascendante due à la poussée d'Archimède et crée ensuite la structure de la flamme délimitée par les points  $ABI$  au-dessus de la strate végétale.

Les quatre modes de transfert de chaleur pris en compte sont :

1- Le rayonnement de la base de la flamme : le rayonnement provenant des particules du corps de la flamme chauffe le combustible non brûlé sur une distance égale à l'épaisseur d'extinction  $\delta$ . La base de la flamme est considérée comme un corps noir qui émet un flux radiatif  $\phi_b$  évalué par la modélisation de Stefan-Boltzmann [199,203],

2- Le rayonnement du corps de la flamme : le front de flammes est considéré comme un panneau radiant gris d'émissivité  $\approx 1$  qui émet un flux radiatif  $\phi_r$  défini suivant Balbi *et al.* [199,203],

3- Le refroidissement convectif : ce refroidissement est provoqué par l'aspiration d'un flux d'air frais de la zone non brûlée, créé par le corps de la flamme, qui influence le rayonnement

et le contact entre la flamme et le combustible non brûlé. Une hypothèse importante consiste à équilibrer ces deux effets loin de la flamme [199,201,203]. Ainsi, au-delà du point  $D$  (figure II-5), le rayonnement de la flamme et le refroidissement convectif s'annulent. On suppose donc que le rayonnement de la flamme n'affecte que le combustible non brûlé situé directement sous la flamme,

4- Le réchauffement convectif  $\phi_c$  : Il est dû au flux de gaz chaud provenant de la base de flamme qui fournit une grande quantité d'énergie au combustible non brûlé. Ce flux a été observé par Finney *et al.* [245].

Le calcul de la vitesse de propagation du feu dépend de la contribution des différents modes de transfert de chaleur. Il dépend également de la charge surfacique  $\sigma$  et de la teneur en eau du combustible mort  $m$ . La relation permettant de le déterminer est la suivante :

$$R = R_b + R_c + R_r \quad (\text{II.72})$$

Avec :

$$R_b = a_b \frac{\phi_b}{\sigma q} \quad (\text{II.73})$$

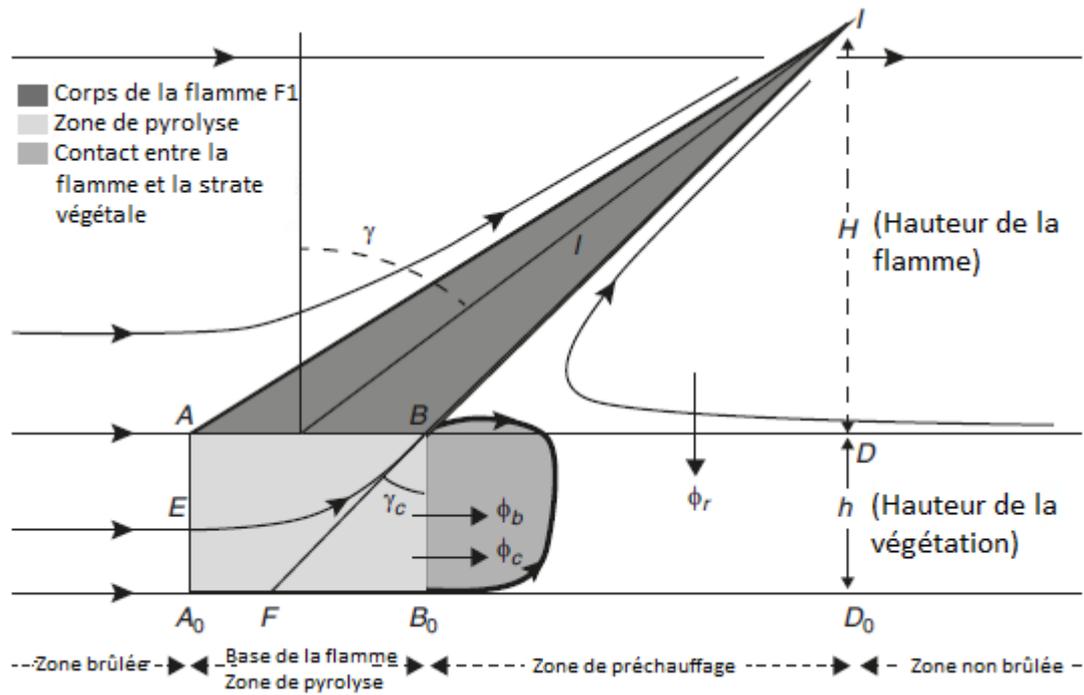
$$R_c = a_c \frac{\phi_c}{\sigma q} \quad (\text{II.74})$$

$$R_r = a_r \frac{\phi_r}{\sigma q} \quad (\text{II.75})$$

$R_\bullet$ ,  $\phi_\bullet$ ,  $a_\bullet$  sont respectivement les contributions des transferts de chaleur au ROS, les flux thermiques et les facteurs d'échelles qui représentent les coefficients d'absorption (limités à une valeur de 1 pour  $a_b$  et  $a_r$ ). Le terme  $q$  représente la quantité de chaleur nécessaire pour l'ignition et donné par la relation :

$$q = C_p(T_i - T_a) + m (\Delta h + C_{pw}(T_{vap} - T_a)) \quad (\text{II.76})$$

Où  $C_p$ ,  $C_{pw}$ ,  $T_i$ ,  $T_a$ ,  $T_{vap}$ ,  $\Delta h$  représentent respectivement la chaleur spécifique du combustible et de l'eau, les températures d'allumage, ambiante et de vaporisation de l'eau et la chaleur latente de vaporisation respectivement.



**Figure II-5.** Représentation schématique de la zone de combustion adoptée dans le modèle

### II.2.1.1 Les facteurs d'échelle

Des modifications ont été apportées sur les facteurs d'échelles afin de prendre en considération le combustible vivant à l'échelle du terrain.

Le facteur d'échelle de la base de la flamme  $a_b$  est proportionnel à la hauteur de la végétation et inversement proportionnel à l'épaisseur d'extinction  $\delta$  comme suit [204] :

$$a_b = \min\left(2 \frac{h}{\delta}, 1\right) \quad (\text{II.77})$$

L'équation (II.77) a subi deux changements : le premier concerne le facteur 2 qui a été supprimé, car à l'échelle du terrain, le sol absorbe une partie du flux radiatif émis par la base de la flamme, ce qui n'est pas le cas à l'échelle du laboratoire où le sol réfléchit ce flux. Le second changement concerne l'épaisseur d'extinction qui est donnée par une relation du même type que la relation de De Mestre *et al.*  $\delta = 2\pi/(s \beta_t)$  [204,246]. Dans cette relation,  $s$  est le rapport surface / volume et  $\beta_t$  la fraction volumique totale de la végétation morte et vivante. Étant donné que la surface foliaire par mètre carré (*leaf area*) égale à  $S_t = s h \beta_t$  est un nombre adimensionnel, le facteur d'échelle  $a_b$  est donné par :

$$a_b = \min\left(\frac{S_t}{2\pi}, 1\right) \quad (\text{II.78})$$

En outre, étant donné qu'une partie du dégagement de chaleur affecte le combustible vivant et en supposant que la propagation de l'interface d'allumage dépend principalement de l'effet catalytique du combustible mort, le rapport des surfaces foliaires (mortes et totales)  $\frac{S}{S_t}$ , est ajouté au facteur d'échelle  $a_b$ . Ce rapport est élevé au carré (Eq. II.79) afin de prendre en compte cet effet de réduction d'énergie sur le rayonnement émis (notion de « puit d'énergie ») et absorbé au niveau de la base de la flamme :

$$a_b = \min\left(\frac{S_t}{2\pi}, 1\right) \left(\frac{S}{S_t}\right)^2 \quad (\text{II.79})$$

De même, le facteur d'échelle  $a_r$  lié au flux radiatif émis par la flamme est modifié et seule l'absorption de ce flux est considérée :

$$a_r = \min\left(\frac{h}{\delta}, 1\right) \frac{S}{S_t} = \min\left(\frac{S_t}{2\pi}, 1\right) \frac{S}{S_t} = \min\left(\frac{S}{2\pi}, \frac{S}{S_t}\right) \quad (\text{II.80})$$

Le facteur d'échelle lié au flux convectif est subdivisé en trois contributions qui correspondent aux pertes énergétiques :

$$a_c = a_{up} a_{lat} a_{liv} \quad (\text{II.81})$$

- Le facteur  $a_{liv}$  est le facteur d'échelle prenant en compte la chaleur fournie pour la végétation vivante :

$$a_{liv} = \frac{S}{S_t} \quad (\text{II.82})$$

- Le facteur  $a_{lat}$  décrit la perte de chaleur sur les bords latéraux du front de feu. Balbi *et al.* [204] supposent que ce facteur est égal à 1 pour une configuration de laboratoire, où les parois latérales limitent les pertes de chaleur sur les côtés au niveau de la zone de combustion [247]. Cependant, à l'échelle du terrain, l'aspiration latérale peut affecter la vitesse du front de flammes en fonction de la largeur de la ligne d'allumage  $W_0$ . Pour une valeur supérieure à 50

m pour le cas des maquis [248], cet effet est très faible et conduit à assumer une valeur de  $a_{lat}$  = 1 :

$$a_{lat} = \min\left(\frac{W_0}{50}, 1\right) \quad (\text{II.83})$$

- Le facteur  $a_{up}$  exprime deux effets combinés. Le premier corrige la quantité de gaz de pyrolyse produits par le flux d'air qui entre dans la base de la flamme au point E (voir Fig. II.3), où la zone délimitée par les points  $BB_0A_0E$  est approximée par la surface du triangle  $BB_0F$ . Le deuxième effet correspond à la chaleur restante dans la zone où se trouvent des particules brûlantes après que la chaleur dégagée vers la partie supérieure du combustible a été évacuée. Cet effet est supposé proportionnel à la surface foliaire totale par mètre carré ( $S_t = s h \beta_t$ ) et inversement proportionnelle à la vitesse ascendante des gaz dans la zone de préchauffage qui est, elle-même, proportionnelle à la racine carrée de la profondeur du lit de combustible (due aux forces de flottabilité) :

$$a_{up} = a_M s \beta_t \sqrt{h} \quad (\text{II.84})$$

Avec  $a_M$  un paramètre considéré comme constant lorsque le modèle est appliqué à des feux à se propageant sur un couvert végétal de types arbustes.

Par conséquent, en utilisant les équations (II.81-II.84), l'équation (II.81) donne :

$$a_c = a_M s \beta_t \sqrt{h} \min\left(\frac{W_0}{50}, 1\right) \frac{S}{S_t} \quad (\text{II.85})$$

### II.2.1.2 *Prise en compte de la convection*

Selon Balbi *et al.* [204], le flux de chaleur convectif peut être modélisé par l'expression suivante :

$$\phi_c = \frac{\Delta H}{2\tau_0} \sigma s \min(h, \delta) \tan \gamma_c \quad (\text{II.86})$$

Avec  $\Delta H$  la chaleur de combustion des gaz de pyrolyse et  $\tau_0$  le paramètre de temps de résidence de la flamme et  $\sigma$  la charge surfacique du combustible mort. L'angle  $\gamma_c$ , comme il est représenté dans la (figure II-5), est défini comme suivant :

$$\tan \gamma_c = \tan \alpha + \frac{U(L)}{u_c} \quad (\text{II.87})$$

Avec  $U(L)$ ,  $u_c$  et  $\alpha$  qui représentent respectivement la vitesse du vent horizontale au point B, la vitesse ascendante des gaz au sommet de la base de la flamme et la pente locale du terrain.

Compte tenu de la dimension verticale de la végétation avec la présence des particules vivantes, la vitesse  $U(L)$  est exprimée en fonction de la vitesse du vent  $U$  à mi-hauteur de la flamme et des forces de traînée [249]:

$$U(L) = U \frac{h}{h + \frac{H}{2}} \exp(-K^*L) \quad (\text{II.88})$$

Avec  $H$ ,  $L$  et  $K^*$  représentent la hauteur de la flamme, sa profondeur et le coefficient de traînée respectivement. La profondeur  $L$  est donnée par  $L = R \tau$  où  $\tau$  est le temps de résidence estimé à partir du rapport surface / volume ( $\tau = \tau_0/s$ ) [250]. La totalité du combustible (mort et vivant) est prise en considération dans la modélisation des forces de traînée, avec le coefficient  $K^*$  qui est linéairement dépendant de la porosité :  $K^* = K_1 s \beta_t$ .  $K_1$  est un coefficient de traînée.

L'équation (II.88) permet d'obtenir :

$$U(L) = U \frac{h}{h + \frac{H}{2}} \text{Exp}(-KR) \quad (\text{II.89})$$

Avec  $K$  une loi des forces de traînée donnée comme suivant :

$$K = \frac{\beta_t}{\min\left(\frac{W_0}{50}, 1\right)} \quad (\text{II.90})$$

Le coefficient  $K_1$  dépend de la largeur du front  $W_0$ . Il peut donc être supprimé et n'est donc plus un paramètre du modèle. Finalement en combinant les équations (II.75, II.86-87, II.89-90), la formulation de  $R_c$  devient :

$$R_c = a_M \min\left(\frac{W_0}{50}, 1\right) \frac{\Delta H \rho_a T_a s \sqrt{h}}{2q(s_t + 1)\rho_v T} \left( \frac{(s_t + 1)}{\tau_0} \frac{\rho_v}{\rho_a} \frac{T}{T_a} \min\left(S, \frac{2\pi S}{S_t}\right) \tan \alpha \right. \\ \left. + U \exp\left(-\frac{\beta_t}{\min\left(\frac{W_0}{50}, 1\right)} R\right) \right) \quad (\text{II.91})$$

## II.2.2 Les principales équations du modèle

En combinant ensuite les équations (Eqs. II.73-II.75, II.79-80, II.85, II.91), l'équation permettant l'évaluation de ROS est écrite sous la forme :

$$R = \min\left(\frac{S_t}{\pi}, 1\right) \left(\frac{S}{S_t}\right)^2 \frac{BT^4}{\beta \rho_v q} + AR \frac{(1 + \sin \gamma - \cos \gamma)}{1 + \frac{R \cos \gamma}{sr_{00}}} + \\ + a_M \min\left(\frac{W_0}{50}, 1\right) \frac{\Delta H \rho_a T_a s \sqrt{h}}{2q(s_t + 1)\rho_v T} \left( \frac{(s_t + 1)}{\tau_0} \frac{\rho_v}{\rho_a} \frac{T}{T_a} \min\left(S, \frac{2\pi S}{S_t}\right) \tan \alpha \right. \\ \left. + U \exp\left(-\frac{\beta_t}{\min\left(\frac{W_0}{50}, 1\right)} R\right) \right) \quad (\text{II.92})$$

Le facteur radiatif  $A$  est donné par l'expression :

$$A = \min\left(\frac{S}{2\pi}, \frac{S}{S_t}\right) \frac{\chi_0 \Delta H}{4q} \quad (\text{II.93})$$

Avec  $\chi_0$  un facteur de rayonnement ayant une valeur de 0.3.

L'équation décrivant l'angle d'inclinaison de la flamme et sa température sont données par les relations [204] :

$$\tan \gamma = \tan \alpha + \frac{U}{u_0} \quad (\text{II.94})$$

$$T = T_a + \frac{\Delta H (1 - \chi)}{(s_t + 1)C_{pa}} \quad (\text{II.95})$$

Où  $C_{pa}$  représente la chaleur spécifique de l'air et la fraction radiative  $\chi$  est supposée égale à la valeur de  $\chi_0$ .

La hauteur de la flamme est calculée en utilisant la relation :

$$H = \frac{u_0^2}{g \left( \frac{T}{T_a} - 1 \right)} \quad (\text{II.96})$$

Où la vitesse verticale ascendante des gaz  $u_0$  est calculée ainsi :

$$u_0 = 2 \frac{(s_t + 1)}{\tau_0} \frac{\rho_v}{\rho_a} \frac{T}{T_a} \min \left( S, \frac{2\pi S}{S_t} \right) \quad (\text{II.97})$$

Afin de calculer numériquement la valeur du ROS, une méthode itérative dite du « point fixe » est nécessaire étant donné que l'équation (II.92) dépend de la vitesse du vent, la pente du terrain, la longueur de la ligne d'allumage, la température ambiante et aussi des caractéristiques du la végétation (FMC du mort, la surface foliaire totale, la fraction volumique, la masse volumique, le rapport surface / volume, la chaleur de combustion et la chaleur spécifique du combustible) et surtout du ROS lui-même. Ainsi, une boucle est effectuée jusqu'à atteindre la convergence.

L'équation (II.92) dépend aussi de plusieurs paramètres :  $s_t$ ,  $r_{00}$ ,  $\chi_0$ ,  $a_M$ . Cependant, ces facteurs sont supposés indépendants des caractéristiques des feux à l'échelle du terrain. Ce modèle est donc un modèle totalement prédictif.

## Chapitre III. Études expérimentales à l'échelle du terrain

---

Depuis plus de soixante-dix ans, la communauté scientifique a montré un certain intérêt vis-à-vis de la problématique des feux de forêt. Ceci s'est traduit par un grand nombre de travaux de recherche sur la modélisation des incendies [186–188,251]. Des études expérimentales liées à la propagation des feux ont également accompagné une grande partie de ces travaux, permettant de caractériser ces phénomènes et de tester les modèles théoriques proposés. Ces études, réalisées à différentes échelles, présentent des approches variées et ont des objectifs différents.

À l'échelle du laboratoire où les conditions de propagation sont souvent maîtrisées, il est possible de répéter des expériences identiques, ce qui est difficilement le cas à l'échelle du terrain. La propagation est souvent étudiée sur une table à combustion où les combustibles les plus utilisés sont de la litière d'aiguilles de pin ou d'eucalyptus ainsi que de la frisure de bois. L'un des principaux objectifs de ces expériences est de développer des modèles empiriques ou semi-empiriques de propagation, à travers des corrélations basées sur des études statistiques des résultats obtenus, ou bien de comparer ces résultats avec des modèles existants [42,188,252–254]. Ces expériences permettent aussi d'étudier l'effet des différents paramètres (humidité, teneur en eau, vent, pente, charge et longueur des particules) sur le comportement du feu ou la géométrie du front de flammes [43,49,211,255–260], ou bien encore d'étudier les différents régimes de propagation [261] et de comprendre le rôle des modes de transfert de chaleur, notamment la convection, sur la propagation du front de flammes [262].

À l'échelle du terrain, des campagnes de feux expérimentaux ayant plusieurs objectifs et enjeux ont été menées sur des combustibles très différents et avec conditions météorologiques et topographiques très variées. Par exemple, des feux expérimentaux (121 feux) ont été menés sur une surface totale de 2500 ha avec un combustible de type herbacé, afin d'étudier et d'établir des corrélations mathématiques pour prendre en compte l'effet des paramètres comme le vent, la pente, du terrain charge surfacique et hauteur de la végétation sur la dynamique du feu [258]. De même, 25 feux expérimentaux ont été conduits sur du maquis dans le sud de la Turquie afin de développer des modèles de propagation prenant en compte la variation de certains paramètres [263]. D'autres expériences (16 feux), menées en Espagne et au Portugal, ont été réalisées sur trois types de maquis et les résultats observés ont ensuite été utilisées pour tester des corrélations présentes dans la littérature permettant d'obtenir la vitesse de propagation en fonction du vent et de la pente du terrain [264]. D'autres travaux expérimentaux ont été menés avec des charges surfaciques différentes de maquis sur des parcelles dont les dimensions variaient entre 20×50 m et 30×80 m. Ces expériences ont permis l'analyse du comportement et de la géométrie des fronts de flammes pour des terrains en pente, ainsi que la mesure des transferts de chaleur radiatifs et totaux au cours de la propagation [265–267]. Butler *et al.* [268] ont étudié la vitesse de propagation et les transferts de chaleurs pour des feux de faibles puissances à l'échelle du terrain conduits à travers des parcelles de pin des marais. Des feux ont été conduits à travers d'autres types de combustibles : forêt de pins, chêne étoilé, chêne blanc, sapin et lichen, ce qui permet d'avoir des données et des observations concernant les feux de cimes et le passage d'un feu de surface à un feu qui se propage dans la canopée des arbres [122,269].

Les mesures permettant de déterminer la dynamique d'un feu expérimental à l'échelle du terrain sont donc très précieuses. En effet, cela s'avère indispensable pour comprendre les mécanismes de propagation du feu qui entraînent les comportements macroscopiques observés,

et aussi pour fournir des données de comparaison pour les outils numériques de la modélisation des feux, tels que les modèles physiques complets. Ce n'est pas toujours le cas pour les incendies à l'échelle du laboratoire, qui peuvent présenter certaines limites de type de combustible utilisé ou de conditions de propagation, qui donnent lieu à des incendies très différents des feux réels. L'importance des feux expérimentaux réalisés dans des conditions se rapprochant le plus possible des feux réels à l'échelle du terrain, est donc un défi pour la communauté scientifique.

En effet, ces expériences demeurent extrêmement problématiques en termes de sécurité et présentent de nombreuses difficultés, surtout lorsque les informations recherchées nécessitent un brûlage dans des conditions météorologiques ou topographiques extrêmes, afin d'étudier des feux de forte puissance. Ces propagations sont souvent soumises aux variations de conditions météorologiques et de la pente du terrain ainsi qu'à l'hétérogénéité du couvert végétal [270]. La combinaison de ces facteurs peut entraîner un comportement imprévisible. Par conséquent, la répétabilité des expériences à l'échelle du terrain est un défi constant, qui implique souvent un grand nombre d'expériences afin de réduire l'erreur statistique, ce qui s'avère coûteux et compliqué à réaliser en pratique. Cela justifie certainement le fait que la plupart des études expérimentales sont réalisées à l'échelle du laboratoire, et/ou sur des parcelles de petites tailles à plat, ou disposant d'une pente faible et avec des vitesses de vent modérées. Lors de ce type de configurations, les feux ont donc des ROS faibles et sont de faible puissance. L'utilisation de ces résultats à des fins opérationnelles est donc très délicate.

Dans le but d'étudier des feux de surface de forte puissance, des expériences ont donc été réalisées à l'échelle du terrain en Corse, sur un combustible de type maquis, suivant un protocole expérimental bien déterminé.

La Corse est l'île la plus boisée de la Méditerranée, et possède un taux de boisement de 58% [271]. Il y a 11 000 ans, la végétation était principalement composée de pinèdes et de bruyères. Un changement important s'est produit il y a environ 6 000 ans dans le couvert végétal,

avec l'expansion des forêts de chênes, qui ont dominé l'île pendant la majeure partie de la période suivante. La végétation actuelle est plus diversifiée avec des prairies et des strates arbustives basses en haute altitude, et avec une chênaie et une végétation sclérophylle (forêts, terres boisées, et broussailles méditerranéennes) en basse altitude [272,273].

Cette île a toujours été sujette à des incendies du fait de son climat méditerranéen chaud et sec marqué par des périodes de sécheresse, sa végétation particulière et ses nombreux terrains accidentés. Au cours de ces dernières années (1973-2019), 2 369 incendies de plus de 10 ha ont eu lieu en Corse, et 305 063 ha (~ 67 779 ha/an) ont été brûlés [274]. Afin de réduire ce risque incendie, les opérationnels en Corse ont adopté des méthodes qui consistent à diminuer la charge du combustible sur une zone donnée en utilisant la technique du brûlage dirigé [275] ou bien en mettant en place des coupures de combustibles (Zone d'Appui à la Lutte) [222,276]. Ces techniques employées permettent de diminuer la puissance d'un feu lors de sa propagation en modifiant la quantité du combustible, sa continuité verticale ou horizontale, et même sa nature. Le but recherché est d'éviter l'occurrence des feux extrêmes et donc incontrôlables [46,52]. Cependant, le réchauffement climatique qui se traduit dans la région méditerranéenne par une aridité estivale accrue et des hivers plus secs engendre une augmentation du risque incendie avec une augmentation de la fréquence et de la sévérité des feux. Par exemple, l'été 2022 a été dévastateur pour les pays méditerranéens en Europe, notamment l'Espagne et la France. Ces deux pays ont enregistré les émissions de carbone les plus élevées résultant des feux de forêt au cours des 20 dernières années [277] Les feux de forêt en France en 2022 ont brûlé plus de 62 000 ha de végétation, ce qui est 7,5 fois supérieure à la moyenne annuelle des quinze années précédentes (2006-2021) [278]. De même, l'Espagne a vu 300 000 ha être réduits en cendres en 2022 suite à plusieurs vagues de chaleur qui ont frappé le pays à partir du mois de mai, résultant le pire bilan depuis le début des mesures en 2000 [279]. Dans ce nouveau contexte, il est devenu indispensable de mieux caractériser et de prévoir le plus précisément

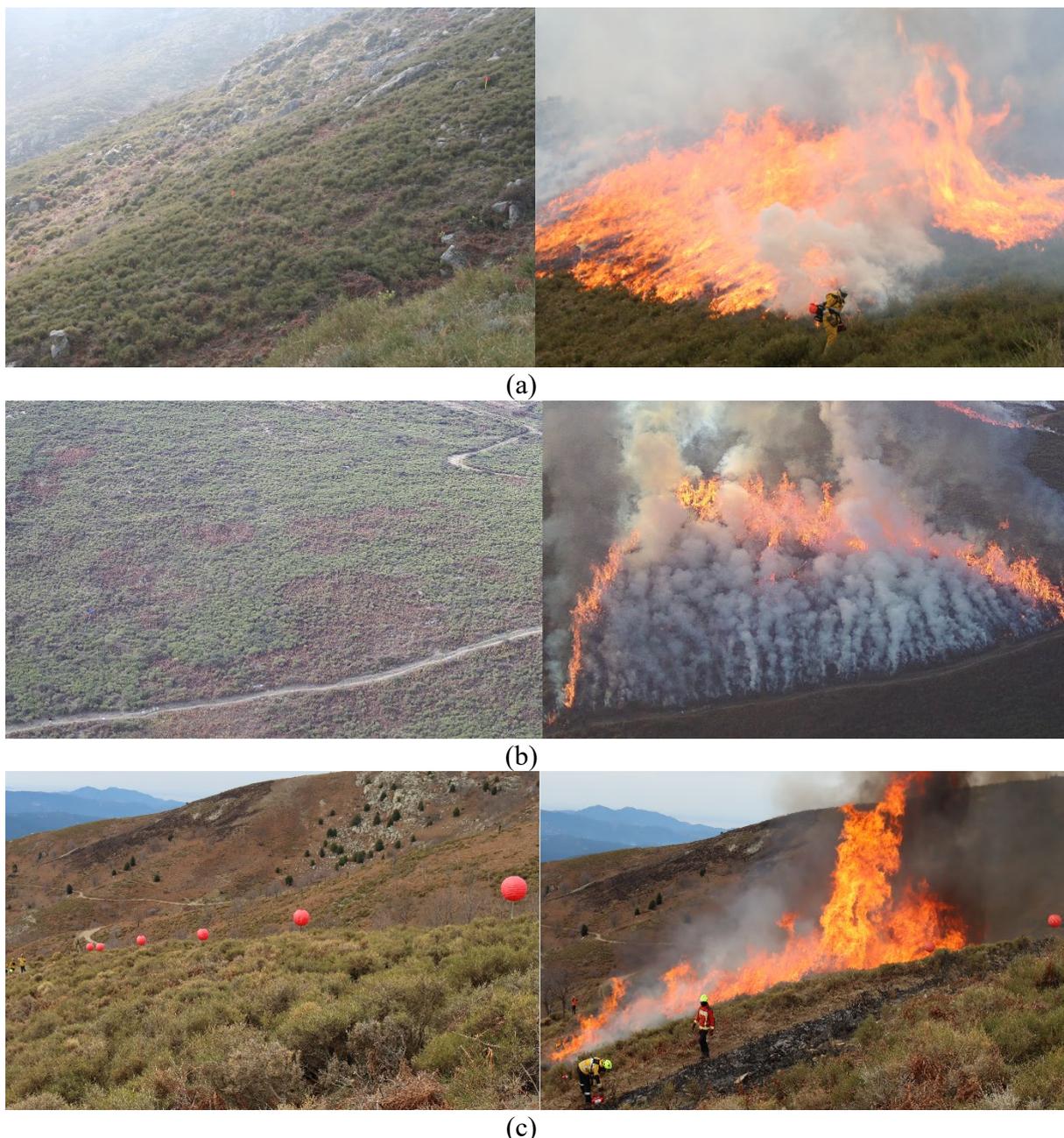
possible ces feux de forte puissance, afin d'adapter les politiques de prévention et de lutte mises en œuvre sur nos territoires. La détermination des conditions de déclenchement des feux de forte puissance s'avère aussi d'une grande utilité pour les services opérationnels.

Pour cette raison, des feux expérimentaux ont donc été réalisés avec un cahier des charges imposant des conditions devant permettre le développement de feux de forte puissance. Le premier objectif était une meilleure compréhension de ces phénomènes et le second de pouvoir réaliser une collecte de données détaillées afin de tester un code physique complet dont dispose l'Université de Corse (FireStar). Ces expériences ont été menées dans le cadre du projet de recherche GOLIAT (Groupement d'Outils pour la Lutte Incendie et l'Aménagement du Territoire), qui est un projet porté par l'Université de Corse et le CNRS et co-financé par la Collectivité de Corse et L'État à hauteur de 1 779 316 €. Ce projet a débuté en janvier 2020 et se terminera en décembre 2023. Il associe des universitaires, des opérationnels de la lutte incendie et de l'aménagement du territoire, et une entreprise afin de réaliser des outils et des actions de sensibilisation répondant à la problématique des incendies de végétation. qui regroupe plusieurs partenaires universitaires et opérationnels, et dont le but est de développer des outils d'aide à la décision et d'aménagement du territoire [280].

Le 1<sup>er</sup> feu expérimental a été organisé en hiver (le 04 mars 2021) par le Service d'Incendie et de Secours de la Haute-Corse sur la commune de Speluncatu (figure III-1 (a)) en Haute-Corse à environ 1000 m d'altitude. Pour cela, 100 opérationnels de la lutte incendie et 9 chercheurs de l'Université de Corse ont travaillé à sa mise en place et au déploiement des différents appareils de mesures. Un deuxième feu a été mené sur la même commune en automne (le 26 Octobre 2021) (figure III-1 (b)). Ce second feu a vu la mobilisation de 50 opérationnels et 10 chercheurs. En mars 2022, deux journées (le 14 et le 15 mars) ont été consacrées à la mise en place d'un feu expérimental conduite sur les hauteurs de la commune de Letia en Corse du sud à 1500 m d'altitude (Figure III-1 (c)). Cette expérience a été assurée par la Direction de la

Prévention des Incendies de la Collectivité de Corse et l'Université de Corse et sécurisée par le Service d'Incendie et de Secours de la Corse du Sud. Des chercheurs de l'Université d'Aix-Marseille, de Toulon et de l'Université Libanaise étaient présents. Le Directeur Général de l'association Pompiers Sans Frontières était également présent.

Ces différentes campagnes se déroulent sur deux journées. La première journée est normalement dédiée à la préparation de la métrologie déposée sur la parcelle : positionnement des différents capteurs (fluxmètres, thermocouples, anémomètre) et repères visuels, relevés GPS, caractérisation du couvert végétal, détermination des angles de prise d'images, vol de reconnaissance des drones. La deuxième journée est consacrée à la sécurisation de la parcelle par les sapeurs-pompiers avec les sapeurs-forestiers et à la mise à feu par ces derniers.



**Figure III-1.** Différentes Parcelles brûlées lors des travaux expérimentaux réalisés à : (a) Speluncatu (04 et 05 mars 2021) ; (b) Speluncatu (25 et 26 Octobre 2021) ; (c) Letia (14 et 15 mars 2022)

## III.1 Méthode expérimentale

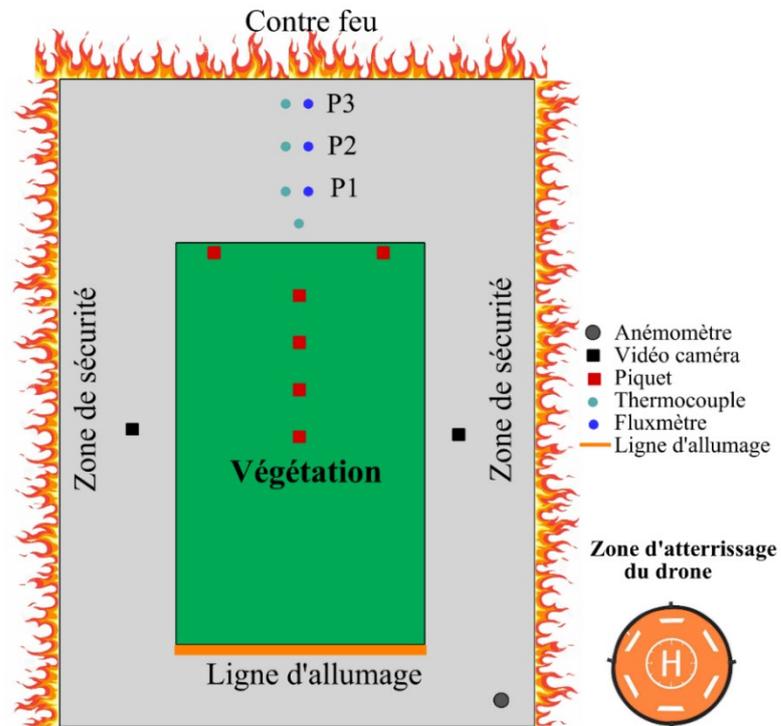
### III.1.1 Le protocole expérimental

Un protocole expérimental a été conçu et adopté par l'ensemble des intervenants afin de conduire ce type d'expériences à l'échelle du terrain et générer des feux de surface de forte puissance (figure III-2). Ainsi, la première phase consiste à sélectionner des parcelles. Cette phase demande plusieurs visites sur site afin de vérifier la faisabilité de l'expérience, les moyens

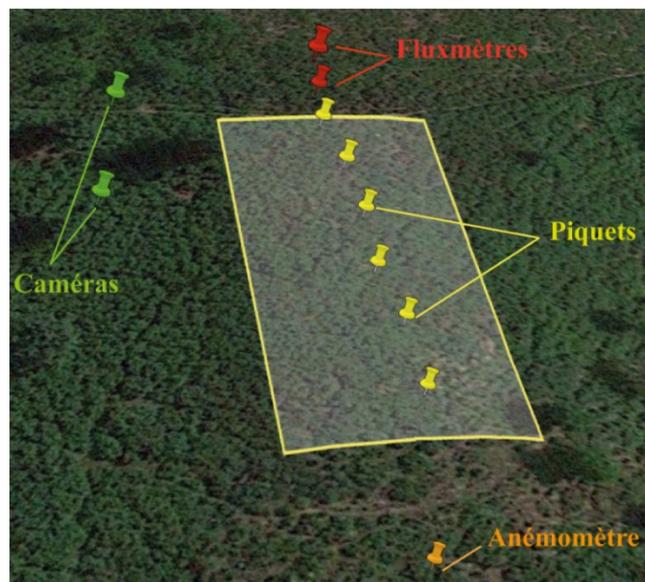
d'accès et la facilité d'aménagement des zones sécurisées. Le choix prend également en compte la topographie, le couvert végétal et le régime de vents présents. En effet, les parcelles sont sélectionnées suivant des critères qui permettent de créer des conditions de feux de forte puissance. Le premier est lié à la topographie du terrain en choisissant des parcelles qui présentent des pentes importantes. La deuxième, porte sur le choix d'une parcelle avec un couvert végétal le plus homogène possible, donc avec un taux de recouvrement élevé. La troisième, porte sur les dimensions et l'orientation des parcelles qui sont choisies dans la direction de la pente principale et avec un vent dominant dans cette direction.

La seconde phase consiste à déterminer les dispositifs de mesures à utiliser pour étudier les principales propriétés thermiques et le comportement du feu. Ainsi, des échantillonnages de combustible sont effectués avant la mise à feu pour caractériser la végétation, et des dispositifs de mesures sont déployés sur le terrain comme le montre la (figure III-3). Des capteurs de flux de chaleur et parfois des thermocouples sont placés dans la zone dépourvue de végétation en haut de la parcelle, afin d'obtenir respectivement les flux de chaleur radiatifs/totaux et la température de l'air à différentes distances du front de flammes. Deux caméras vidéo sont placées sur les côtés, de part et d'autre de la parcelle, dans le but d'étudier les caractéristiques géométriques de la flamme. Afin de visualiser la propagation et la géométrie du front de flammes, une caméra Visible-IR est montée sur un drone qui enregistre le passage du front de feu à travers des piquets bien positionnés. La caméra IR permet donc d'avoir des informations même en présence de fumées. Ces piquets servent également pour l'obtention de la valeur moyenne de la pente principale du terrain en mesurant précisément leurs coordonnées à l'aide d'un système de navigation par satellite (GNSS) de haute précision. Les propriétés du vent et les conditions météorologiques locales sont enregistrées à l'aide d'une station météorologique portable.

L'allumage du front de flammes, est assuré uniquement par les opérationnels et s'effectue linéairement afin d'entraîner une propagation dans la direction de la pente. Les différentes parties de ce protocole expérimentale vont être détaillées dans la suite du document.



**Figure III-2.** Vue schématique de la parcelle expérimentale et de l'emplacement des dispositifs de mesure



**Figure III-3.** Vue du site expérimental (Letia Octobre 2021) obtenue à l'aide de Google Earth et les principales relevés GNSS sur le terrain

### III.1.2 Caractérisation de la végétation

Les sites choisis sont principalement recouverts de *Genista salzmannii*, des sous-arbrisseaux épineux qu'on trouve dans des différentes zones géographiques principalement en Corse et en Sardaigne. Ce type de végétation est fréquent en montagne en Corse et même au-dessus de 1200 m d'altitude (figure III-4). Cette espèce est caractérisée par une très forte homogénéité et un taux de recouvrement qui peut dépasser les 90% [281].



**Figure III-4.** Parcelle de *Genista salzmannii* (*Speluncatu*, haute-Corse)

Les propriétés thermochimiques de ce combustible (telles que la capacité calorifique ou l'enthalpie de combustion) peuvent être trouvées dans la littérature [281]. En revanche, d'autres propriétés physiques, telles que la teneur en eau, la fraction volumique, la hauteur du combustible et sa charge surfacique, sont spécifiques à la zone géographique et dépendent aussi fortement des conditions météorologiques. La caractérisation du combustible est effectuée à plusieurs endroits différents sur le terrain par un échantillonnage, en appliquant un inventaire destructif utilisant une méthode en cube [210]. Afin de calculer la teneur en eau de la végétation, des échantillons de combustible morts et vivants de diamètre inférieur à 6 mm (supposés contribuer principalement à la propagation du feu) [209], sont collectés dans des sacs en plastique hermétiques à double fermeture. Ces échantillons sont considérés comme étant constitués d'un seul type de combustible. La teneur en eau évaluée correspond donc à une valeur

moyenne prenant en compte les particules mortes et vivantes. Tous les échantillons sont séchés dans des étuves à 60°C pendant 48h [211] (figure III-5).



**Figure III-5.** Séchage des échantillons dans l'étuve pour l'évaluation de : (a) la charge surfacique, (b) la teneur en eau

Les échantillons qui servent à déterminer la teneur en eau sont pesés avant et après le séchage afin de calculer la FMC ( $m$ ) suivant la formule suivante :

$$m = \frac{\psi_i - \psi_0}{\psi_0} \quad (\text{III.1})$$

Où,  $\psi_i$  est la masse du combustible mesurée avant séchage et  $\psi_0$  est la masse du combustible pour une teneur en eau nulle.

Afin de déterminer la charge surfacique, il suffit de déterminer la valeur moyenne, après séchage, des masses des échantillons de combustible collectés sur deux lots de 1 m<sup>2</sup>.

En ce qui concerne la hauteur de la végétation, elle est évaluée en mesurant la distance entre le sol et le sommet de la végétation pour 20 points répartis sur l'ensemble de la parcelle (figure III-6). Il est alors possible de déterminer la fraction volumique en divisant la charge du combustible sec mesurée au laboratoire, par le produit de la hauteur moyenne de la végétation et de la densité des particules.



**Figure III-6.** *Mesure de la hauteur de la végétation sur le terrain*

### **III.1.3 Météorologie**

Les conditions météorologiques ambiantes sont enregistrées à moins de 50 m de la ligne centrale de la parcelle. La vitesse et la direction du vent sont obtenues à l'aide d'un anémomètre ultrasonique bidimensionnel (WS425, Vaisala) situé à 3 m au-dessus du sol (figure III-7). Ce relevé permet d'obtenir le vent moyen agissant sur le front de flammes. L'anémomètre est situé en contrebas de la parcelle afin de minimiser l'influence du feu sur les mesures du vent. La température de l'air et l'humidité relative sont relevées pendant la propagation du feu à l'aide d'une station météo (Kestrel 5500, Kestrel Instruments) (figure III-8).



**Figure III-7.** *Anémomètre bidimensionnel situé à 3 m du sol pour mesurer la vitesse et la direction du vent*



**Figure III-8.** *Station météo (Kestrel 5500)*

### **III.1.4 Évaluation du ROS : drones et technologie de vision**

Pendant l'expérience, la propagation du front de feu est enregistrée à l'aide d'un ou deux drones survolant la parcelle, et depuis le côté à l'aide des deux caméras (GoPro Hero4, GoPro Hero+), placées au niveau du sol. Le drone utilisé est un DJI M210 équipé d'une caméra Zenmuse XT2 comportant à la fois une caméra infrarouge à ondes longues FLIR (bande spectrale 7,35-13,5  $\mu\text{m}$ ), et une caméra visible, avec des résolutions respectives de 3840×2160

et 640×512 pixels. Le drone est situé normalement à une hauteur d'environ 100 m, ce qui permet des prises de vue de la totalité de la propagation sur la parcelle. Afin de reconstituer à l'aide des enregistrements vidéo les différents contours du front de flammes, des piquets sont disposés préalablement à des distances équidistantes sur la ligne de la plus forte pente au milieu de la parcelle (Figure III-9). La vitesse de propagation est alors déterminée en relevant les instants pour lesquels le front de feu traverse chaque point de référence. Cela permet ensuite d'évaluer le ROS lorsque le feu atteint un régime de propagation établi.



**Figure III-9.** *Positionnement des piquets servant pour la détermination de la vitesse de propagation du front de flammes*

### **III.1.5 Mesures des flux thermiques**

Un des objectifs de ces expériences est aussi d'évaluer l'impact du front de flammes sur des cibles positionnés dans une zone au-dessus de la parcelle. Cela se fait grâce à des paires de transducteurs Medtherm (séries 16H et 64, Medtherm Corp, Huntsville, AL, USA) qui mesurent les flux de chaleur radiatifs et totaux, situées en haut de la parcelle à brûler. Une fenêtre en saphir est ajoutée aux fluxmètres radiatifs pour éliminer la chaleur convective transférée à la zone de détection. Les transducteurs utilisés sont calibrés de 0-200 kW/m<sup>2</sup> et ont un temps de réponse inférieur à 0,25 s. Des études expérimentales ont montré qu'un flux thermique total maximal de 112 kW/m<sup>2</sup> pouvait être atteint en amont du front de feu [266]. Les transducteurs

radiatifs et totaux ont un angle de vue respectivement de 150° et 180°. Ils sont orientés vers le feu et dans le sens de la pente. Ces capteurs de flux sont fixés sur des tiges de support de 0,5 m de haut situées à différentes positions de la limite supérieure de la parcelle de végétation. Les jauges des flux thermiques sont branchées à un enregistreur de données, alimenté en électricité (CR3000, Campbell Scientific) et enterré à 0,3 m dans le sol pour le protéger du feu. Les câbles d'extension des capteurs sont isolés par un revêtement en téflon et des feuilles d'aluminium (figure III-10), et sont enterrés dans le sol. Les signaux analogiques de tous les transducteurs sont enregistrés à une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz.



**Figure III-10.** *Capteurs de flux radiatifs et totaux fixés sur des supports et protégés par des feuilles d'aluminium*

## **III.2 Difficultés et contraintes**

Comme il a déjà été mentionné précédemment, ce type d'expériences, à l'échelle du terrain, est compliqué à mettre en œuvre car il existe de nombreuses contraintes. Certaines difficultés ont été rencontrées dans la planification de ces brûlages. D'une part, tous les sites choisis sont situés en montagne, ce qui implique qu'ils sont difficilement accessibles et nécessitent l'utilisation de véhicule tout terrain (4×4). Le transport et la mise en place des

dispositifs demandent donc plus de temps et d'efforts physiques que pour d'autres feux expérimentaux situés non loin des voies d'accès. D'autre part, ces expériences peuvent être soumises à des conditions météorologiques instables comme par exemple le brouillard qui était tombé lors du premier feu sur la commune de Speluncatu (05 mars 2021), et a qui a rendu impossible l'évaluation de la longueur de la flamme et son angle d'inclinaison visuellement à l'aide des caméras vidéo latérales. D'autres paramètres comme le changement de la direction du vent peut venir perturber le déroulement prévu de l'expérience. Cela a été le cas pour une expérience prévue sur une autre parcelle à Speluncatu le 06 mars 2021, où après avoir disposé le matériel et collecté les échantillons pour la caractérisation de la végétation, le vent a changé brusquement de direction et a soufflé dans le sens contraire de la pente juste avant la mise à feu. Cela ne nous a donc pas permis d'obtenir un feu de forte puissance qui se propageait dans la direction principale de la pente, et qui était le scénario préalablement désiré.

### **III.3 Résultats expérimentaux : végétation, météorologie et topographie**

Les résultats concernant les propriétés de la végétation, ainsi que les conditions météorologiques et topographiques issues du protocole expérimental appliqué dans les trois expériences réalisées, sont présentés dans le tableau (III-1). On peut constater à partir de ces résultats que les conditions de propagation étaient marginales. Cela se manifeste par des teneurs en eau élevées accompagnées parfois de fortes humidités relatives, des températures ambiantes basses, et des régimes de vent faibles dans la direction principale de la pente. Cependant les sites sélectionnés présentent des pentes moyennes (29% (Letia Mars 2022) et 40% (Speluncatu Octobre 2021)), ainsi que des pentes importantes (53% (Speluncatu Mars 2021)), ce qui peut générer des feux de forte puissance.

Ces résultats détaillés (tableau III-1), décrivant les conditions de propagation au cours de ces trois expériences, vont servir de données d'entrée pour reproduire numériquement ces feux expérimentaux sur les modèles physiques complets FireStar 2D et 3D.

**Tableau III-1.** Résultats expérimentaux sur la caractérisation de la végétation et les conditions météorologiques et topographiques mesurées lors des expériences du terrain

	Speluncatu Mars (2021)	Speluncatu Octobre (2021)	Letia Mars (2022)
<b>Végétation (<i>Genista salzmannii</i>)</b>			
Teneur en eau, $m$ (%)	65	56	51
Épaisseur du combustible, $e$ (m)	0,6	0,85	0,68
Charge surfacique, $\sigma$ (kg/m <sup>2</sup> )	1,8	1,79	2,67
Fraction volumique, $\beta$	0,0031	0,0021	0,004
Rapport surface / volume, $s$ (m <sup>-1</sup> )		3100	
Masse volumique, $\rho_{sec}$ (kg/m <sup>3</sup> )		970	
Capacité calorifique, $C_p$ (J/kg/K)		1648	
Chaleur de combustion, $\Delta H_c$ (J/kg)		1,8620×10 <sup>7</sup>	
<b>Météo et topographie</b>			
Vitesse moyenne du vent $U_3$ (m/s)	1,67	1,3	1,3
Température ambiante $T$ (°C)	6	18	15
Humidité relative $RH$ (%)	82	53	36
Pente du terrain (°)	28	22	16
Dimensions parcelles (m <sup>2</sup> : largeur × Longueur)	30 × 130	30 × 170	30 × 60

# Chapitre IV. Études numériques des feux expérimentaux

---

## IV.1 Domaines de calcul et configurations numériques

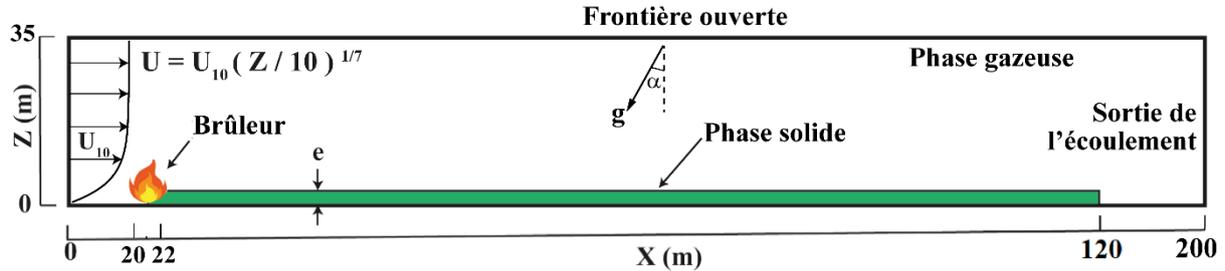
### IV.1.1 FireStar2D

Comme il est possible de le voir sur la figure (IV-1), les simulations numériques sont effectuées dans un domaine de calcul bidimensionnel, de longueur égale à 200 m et de hauteur de 35 m, où la végétation est distribuée d'une manière homogène entre  $X = 20$  m et  $X = 120$  m. Il est à noter que la longueur de végétation choisie dans la configuration numérique peut varier d'une expérience à l'autre, et que cette longueur doit obligatoirement permettre d'obtenir un régime de propagation établi. Les particules du combustible solide sont supposées se comporter comme un corps noir (émissivité thermique  $\varepsilon = 1$ ), et l'approximation d'une classe de végétation avec une forme cylindrique a été adoptée. Le profil de vitesse imposé à l'entrée gauche du domaine suit une loi de puissance, suivant l'équation (IV.1) :

$$U_z = U_{10} \left( \frac{z}{10} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (\text{IV.1})$$

La mise à feu est réalisée par l'injection du monoxyde de carbone (CO) à une température de 1600 K à travers le sol entre 20 et 22 m, pendant 5 s, et avec une vitesse constante de 1 m/s [57,211]. Le CO est injecté de cette manière après un temps de simulation de 30 s qui permet l'établissement et la stabilisation des couches de turbulence à l'intérieur et au-dessus du combustible [55].

Numériquement, dans FireStar 2D et 3D, l'angle d'inclinaison du domaine est défini par deux composantes de l'accélération gravitationnelle non nulles :  $g_X = -g \sin(\alpha)$  et  $g_Y = -g \cos(\alpha)$ , avec  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  qui représente la gravité terrestre.



**Figure IV-1.** Représentation du domaine et des conditions aux limites correspondants aux simulations numériques avec FireStar2D

Pour obtenir des résultats robustes et convergents, les dimensions des mailles doivent respecter des critères physiques liés à la structure de la végétation [55,56] :

$$\Delta_x < \delta = \frac{4}{s\beta} \quad (\text{IV.2})$$

$$\Delta_z < \min\left(\frac{e}{4}, \delta\right) \quad (\text{IV.3})$$

Avec  $s$  le rapport surface / volume des particules solides,  $\beta$  la fraction volumique et  $e$  la hauteur du lit de combustible. Dans la direction horizontale  $X$  qui est celle de la propagation du feu, la longueur de la maille doit être inférieure à la longueur d'extinction  $\delta$ , pour éviter l'extinction du feu surtout dans les régimes de propagation dominés par le rayonnement [56]. Le critère sur l'axe vertical  $Z$  est lié à une représentation optimale des diverses structures de turbulence dues à l'effet de cisaillement induit par les couches de la végétation [282]. Les maillages adoptés dans les configurations numériques pour représenter les trois expériences de terrain, sont présentés dans le tableau (IV-1) :

**Tableau IV-1.** Dimensions du maillage des configurations numériques FireStar2D pour les trois expériences réalisées à l'échelle du terrain

	Expérience Speluncatu (Mars 2021)	Expérience Speluncatu (Octobre 2021)	Expérience Letia (Mars 2022)
Longueur d'extinction $\delta$ (m)	0,42	0,59	0,32
$(\Delta_X, \Delta_Y)$ (m)	(0,2 ; 0,15)	(0,3 ; 0,22)	(0,16 ; 0,12)

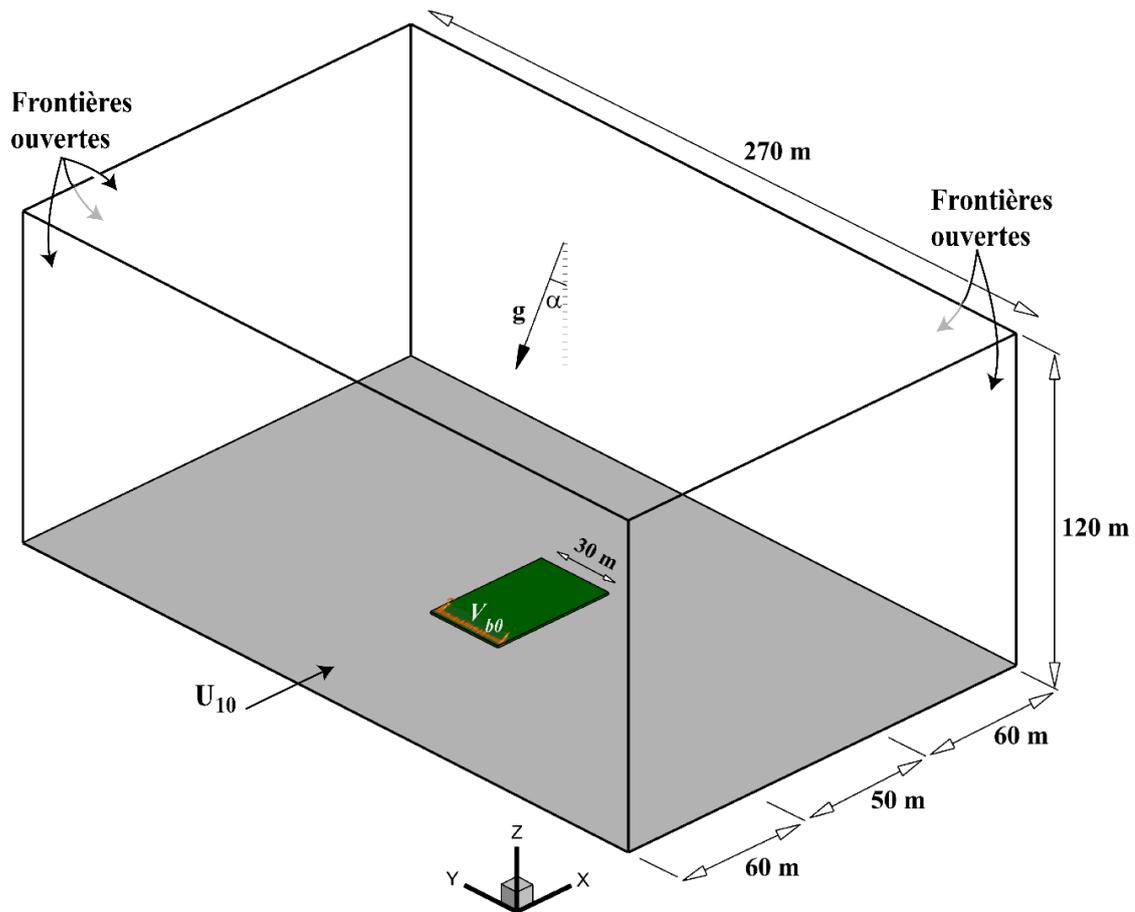
### IV.1.2 FireStar3D

Le domaine de simulation 3D présente une végétation homogène, répartie selon des dimensions indiquées dans la figure (IV-2). Le combustible décrit dans le tableau (III-1) est considéré comme un corps noir composé de particules cylindriques. Initialement (à  $t = 0$ ), le profil de vitesse décrit dans l'équation (IV.1) est imposé dans le domaine, et le modèle hydrodynamique du code est lancé jusqu'à atteindre un régime établi. Après l'établissement des flux et de la turbulence dans le domaine, le brûleur est activé en injectant du CO ( $T = 1600$  K) à travers le sol avec une vitesse  $V_j$  qui diminue linéairement avec la masse du combustible sec brûlé (Eq. IV.4). Cela évite de déstabiliser le front de feu en arrêtant brusquement l'injection.

$$V_j(\text{cm/s}) = 10 \times (1 - m_b/m_{b0}) \quad (\text{IV.4})$$

Où  $m_{b0}$  est la masse initiale de matière sèche située au-dessus du brûleur (c'est-à-dire la masse de matière sèche à l'intérieur du volume  $V_{b0}$  ( $V_{b0} = \text{largeur du brûleur} \times \text{largeur de la végétation} \times e \text{ m}^3$ ). Après l'allumage, des conditions Neumann sont appliquées à l'entrée du domaine. La condition limite de Neumann spécifie que, pour un paramètre donné ( $\varphi$ ), la dérivée normale sur une frontière doit être nulle ou constante ( $\frac{d\varphi}{dn} = \text{constante}$ ).

Un gradient de pression artificielle automatiquement ajusté est imposé au sommet du domaine, pour maintenir la composante de vitesse à cette position, dans la direction X, égale à la valeur initiale évaluée à  $t = 0$ .



**Figure IV-2.** Représentation du domaine et des conditions limites correspondants aux simulations numériques avec FireStar3D

Un maillage uniforme est utilisé pour le domaine solide, tandis qu'un maillage affiné vers les parois, est imposé pour le domaine gazeux (figure IV-3). Dans la zone de végétation, le maillage du domaine gazeux est uniforme et deux fois plus large (dans chaque direction) que le maillage du domaine solide, tandis qu'il est progressivement affiné vers les parois rigides en fonction de la progression géométrique. Les dimensions des mailles adoptées dans les zones solides et gazeuses sont caractérisées par des tailles inférieures aux longueurs d'extinction de la végétation (Eq. IV.2), comme il est possible de le voir dans le tableau (IV-2) suivant :

**Tableau IV-2.** Dimensions des mailles des phases solides et gazeuses dans les configurations FireStar3D des deux expériences du terrain : Speluncatu Octobre 2021 et Letia Mars 2022

	Expérience Speluncatu (Octobre 2021)	Expérience Letia (Mars 2022)
Longueur d'extinction $\delta$ (m)	0,59	0,32
$(\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z)$ (m)	(0,4 ; 0,4 ; 0,034)	(0,3 ; 0,3 ; 0,03)
$(\Delta_X^S, \Delta_Y^S, \Delta_Z^S)$ (m)	(0,2 ; 0,2 ; 0,017)	(0,15 ; 0,15 ; 0,015)

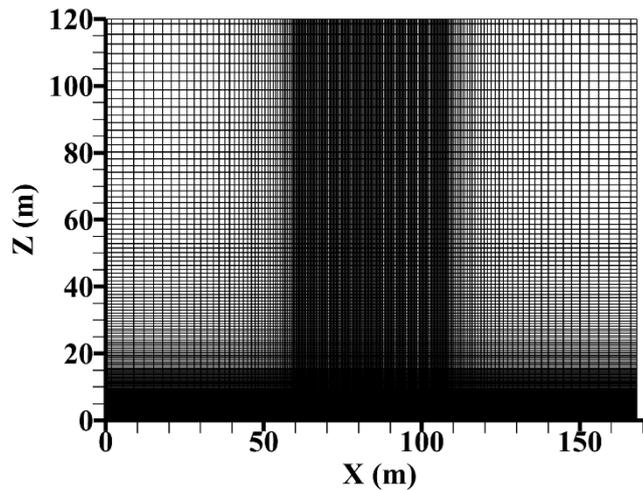


Figure IV-3. Maillage de la phase gazeuse dans le plan (XZ) sur FireStar3D

## IV.2 Méthodes d'évaluation des paramètres caractérisant le comportement du feu

La modélisation numérique et expérimentale des feux de forte puissance a deux objectifs principaux : le premier est d'évaluer le comportement et la dynamique de ce type de feu liés principalement à sa vitesse de propagation et à son intensité, et le second est de prédire son impact sur des cibles connues. L'impact dépend des flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus par des cibles situées à différentes distances du front de flammes. Les méthodes d'évaluation des paramètres caractérisant le comportement du feu (ROS, intensité du front et flux de chaleur) sont décrites ci-après.

### IV.2.1 Vitesse de propagation : ROS

L'évaluation expérimentale du ROS, comme indiqué précédemment (section III.1.4), est basée sur la mesure du temps nécessaire pour que le feu parcoure la distance séparant des piquets consécutifs équidistants. Numériquement, le calcul du ROS est basé sur la variation dans le temps de la position du front de pyrolyse sur la surface du combustible lorsque le front de feu a atteint un régime établi.

## IV.2.2 Intensité du front de flammes

L'intensité du front de feu par unité de longueur du front de flammes est une grandeur qui ne peut pas être mesurée expérimentalement et qui est donc seulement estimée à partir d'autres quantités qui peuvent l'être. Il existe différentes méthodes pour évaluer cette intensité au milieu du front de feu, où il atteint sa valeur maximale. Comme indiqué dans la formulation de Byram (Eq. IV.5), la méthode expérimentale utilise la vitesse du front de feu  $ROS$ , l'enthalpie de combustion de la végétation  $\Delta H_c$ , et la masse du combustible consommé pendant la propagation  $w_a = \mu \sigma$  où  $\mu$  est la fraction de la masse du combustible brûlé dans le front de flammes actif, contribuant effectivement à la propagation du feu [283,284].

$$I_{BExp} = ROS \times \Delta H_c \times w_a \quad (IV.5)$$

La méthode d'évaluation numérique qui est adoptée par FireStar2D (Eq. IV.6) utilise la perte de masse  $\dot{m}$  de la végétation due à la pyrolyse des matières sèches et à la combustion du charbon de bois [55]:

$$I_{BNum} = \dot{m} \times \Delta H_c \quad (IV.6)$$

Avec FireStar3D, l'intensité du feu est estimée à partir du taux de dégagement de chaleur  $HRR$  défini dans l'ensemble du domaine de calcul, comme indiqué dans l'équation (IV.7) :

$$HRR = -\omega_{vap} \Delta H_{vap} - \omega_{pyr} \Delta H_{pyr} + \omega_{char} \Delta H_{char} + \omega_{CO} \Delta H_{CO} + \omega_{suies} \Delta H_{suies} \quad (IV.7)$$

Où  $\omega_{vap}$ ,  $\omega_{pyr}$ ,  $\omega_{char}$ ,  $\omega_{CO}$  et  $\omega_{suies}$  sont respectivement les taux massiques totaux d'évaporation de l'eau, de pyrolyse, de combustion du charbon de bois, de combustion du CO dans le mélange gazeux et de combustion des suies.  $\Delta H_{vap}$ ,  $\Delta H_{pyr}$ ,  $\Delta H_{char}$ ,  $\Delta H_{CO}$  et  $\Delta H_{suies}$  sont les enthalpies de réaction correspondantes [58].

L'intensité du feu par unité de longueur du front de flammes est ainsi calculée en divisant la valeur moyenne du  $HRR$  lorsque le feu est établi, par la largeur  $w$  du front de feu [57,58] (Eq. IV.8) :

$$I_{BNum} = \frac{HRR}{w} \quad (IV.8)$$

### IV.2.3 Flux thermiques

Le transfert de chaleur par rayonnement et par convection joue un rôle essentiel dans l'évaluation de l'impact du feu sur des cibles. Le mode de transfert de chaleur dominant dépend des conditions de vent et de la pente du terrain. Ces paramètres influencent l'angle d'inclinaison de la flamme et, par conséquent, les flux de chaleur reçus par la cible située devant le front de flammes.

Dans FireStar, l'évaluation numérique du transfert de chaleur par rayonnement est basée sur l'irradiance totale  $J$ , calculée grâce à l'intégration de l'intensité radiative  $I$  dans toutes les directions (Eq. II.61) [56].

La variation de  $I$  le long d'un chemin optique  $S$ , est obtenue à partir de l'équation de transfert du rayonnement (ETR) qui décrit sa propagation à travers un milieu absorbant et un milieu émetteur (Eq. II.62). Les détails du calcul du rayonnement sont présentés dans le chapitre II.

Pour évaluer le flux convectif reçu par le fluxmètre, la loi de refroidissement de Newton [270], donnée par l'équation (Eq. IV.9), est utilisée. Dans cette équation,  $T - T_a$  représente la différence entre la température du mélange gazeux et la température de la cible (supposée être égale à la température ambiante) et  $h_c$  est le coefficient de transfert de chaleur convectif.

$$Q_{conv} = h_c [T - T_a] \quad (IV.9)$$

Pour la convection forcée sur le fluxmètre supposé être une plaque plane,  $h_c$  est calculé à partir de la corrélation donnée par l'équation (IV.10), où l'écoulement est considéré comme laminaire à la surface du capteur même si la flamme est fortement turbulente [266].  $L_c$  est la longueur caractéristique qui dépend de la forme de la cible (égale au diamètre du fluxmètre dans ce cas).  $k$  est la conductivité thermique du mélange gazeux.  $Re$  est le nombre de Reynolds basé sur  $L_c$ , et  $Pr$  est le nombre de Prandtl du mélange gazeux.

$$h_c = \frac{k}{L_c} 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

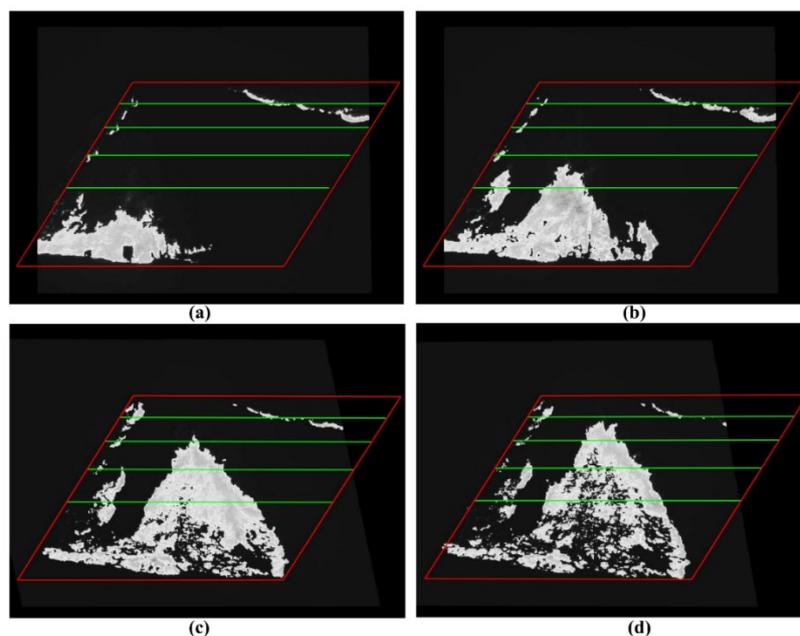
(IV.10)

# Chapitre V. Résultats et discussions

---

## V.1 Vitesse de propagation : ROS

Comme décrit précédemment (section III.1.4), le ROS est évalué expérimentalement à partir des vidéos et des images infrarouges enregistrées par les drones. Par exemple, pour l'expérience de Speluncatu (Mars 2021), la figure (V-1) montre la position du front de feu au cours de sa propagation. Les intervalles de temps nécessaires pour que le feu parcoure la distance entre des piquets équidistants (représentés sous forme de lignes vertes), sont indiqués dans le tableau (V-1). Pendant les 22 premières secondes, juste après l'établissement de la ligne d'allumage, estimé à  $t = 12:53:30$ , le feu s'est propagé avec une vitesse de propagation égale à 1,136 m/s, puis il a ralenti à 0,423 m/s, avant d'atteindre une vitesse de propagation quasi-constante entre les trois derniers piquets (piquet 2 – piquet 4) de 0,45 m/s.



**Figure V-1.** Images infrarouges du front de flammes entre des positions équidistantes (les lignes vertes passant par des piquets préfixés) à différents instants en prenant  $t = 0$  s à 12 :49 (heure de la mise à feu) : (a)  $t = 140$  s ; (b)  $t = 242$  s ; (c)  $t = 360$  s ; (d)  $t = 422$  s

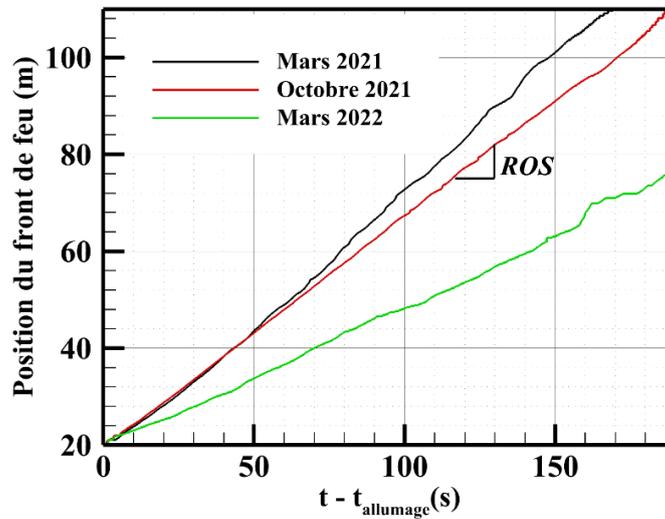
**Tableau V-1.** Intervalle de temps lors de la propagation du feu entre deux piquets consécutifs.

	Distance séparant deux piquets (m)	Intervalles de temps (s)	ROS (m/s)
Ligne d'allumage - Piquet 1	25	22	1,136
Piquet 1 - Piquet 2	25	59	0,423
Piquet 2 - Piquet 4	50	111	0,45

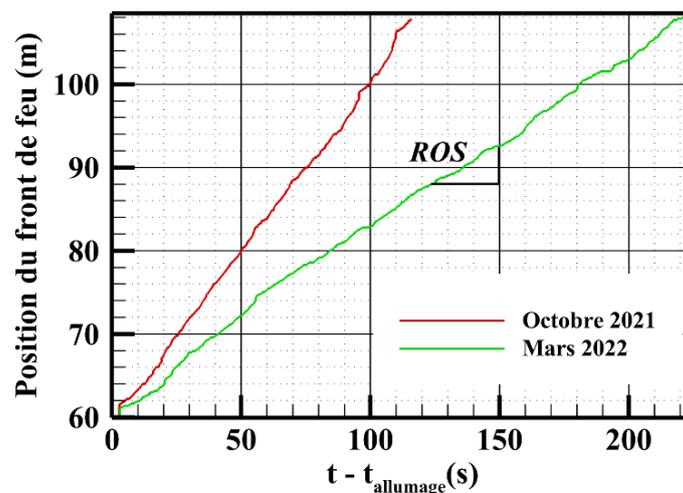
Ces résultats montrent qu'une phase transitoire a eu lieu avant l'établissement d'un régime établi (durant les 22 premières secondes) où la vitesse moyenne du front a été estimée à 1,136 m/s. Deux raisons peuvent être invoquées pour expliquer cela. Cette phase avec une vitesse plus élevée peut-être due à l'excès de carburant versé pour la mise à feu de la ligne d'allumage (à l'aide de torches à goutte). Le processus d'allumage non symétrique (pour des raisons de sécurité) appliqué dans ce brûlage, peut également expliquer un tel comportement pendant les premiers instants de la propagation. En effet, en raison de ce processus d'allumage asymétrique, le front de flammes commence à se déplacer du côté de la mise à feu de départ (côté gauche de la parcelle) à une vitesse plus importante que le reste de la ligne qui s'enflamme progressivement. En raison de la faible vitesse du vent, le front de feu s'établit ensuite le long du périmètre de la parcelle pour se propager alors avec une vitesse quasi-constante de 0,45 m/s. Dans les deux autres expériences (Speluncatu Octobre 2021 et Letia Mars 2022), une autre méthode d'allumage non-uniforme a été appliquée. Cette fois-ci, la mise à feu a été faite en partant du centre de la ligne d'allumage jusqu'aux extrémités afin de réduire significativement le temps d'allumage et obtenir plus rapidement un front symétrique de part et d'autre du point d'allumage. Durant ces expériences les feux ont atteint des régimes de propagation établis, avec des vitesses de 0,38 m/s et 0,21 m/s respectivement.

Les figures (V-2 et V-3) montrent la distance parcourue par le front de pyrolyse en fonction du temps dans chaque expérience, évaluée avec FireStar2D et 3D. Les valeurs numériques des

ROS obtenues à l'aide des pentes moyennes de ces courbes, ainsi que les ROS expérimentaux, sont présentés dans le tableau (V-2).



**Figure V-2.** Variations dans le temps du point le plus éloigné du front de pyrolyse sur la surface du combustible obtenues avec FireStar2D après la mise à feu



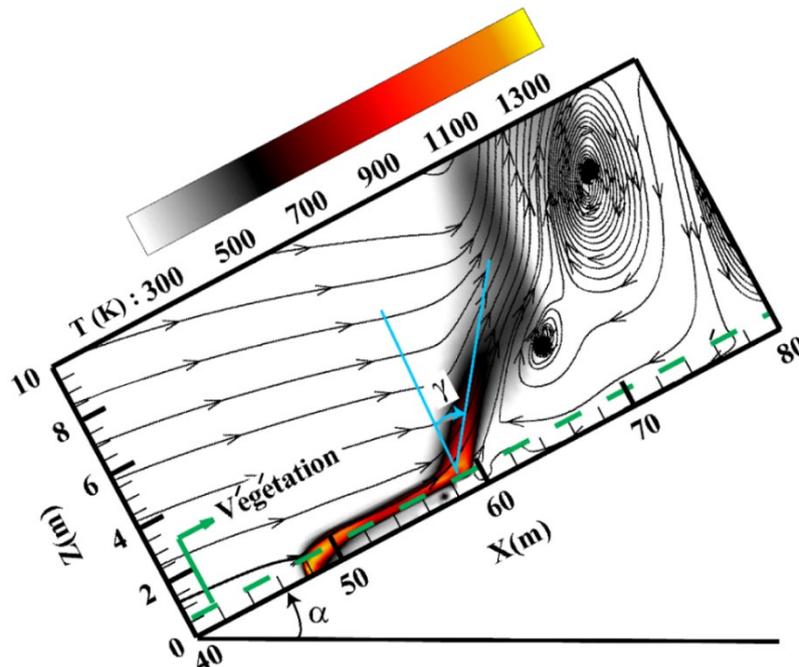
**Figure V-3.** Variations dans le temps du point le plus éloigné du front de pyrolyse sur la surface du combustible obtenues avec FireStar3D après la mise à feu

**Tableau V-2.** Valeurs du ROS expérimental et numérique obtenues avec FireStar2D et 3D

	Mars 2021		Octobre 2021			Mars 2022		
	Expérience	2D	Expérience	2D	3D	Expérience	2D	3D
ROS (m/s)	0,45	0,5	0,38	0,47	0,41	0,21	0,29	0,2

Les résultats numériques du ROS obtenus avec FireSar3D sur les expériences d'Octobre 2021 et de Mars 2022 sont en très bon accord avec les mesures expérimentales, avec des erreurs relatives de 7,9% et 5%. Il est à noter que les prédictions de ROS obtenues avec l'approche 2D

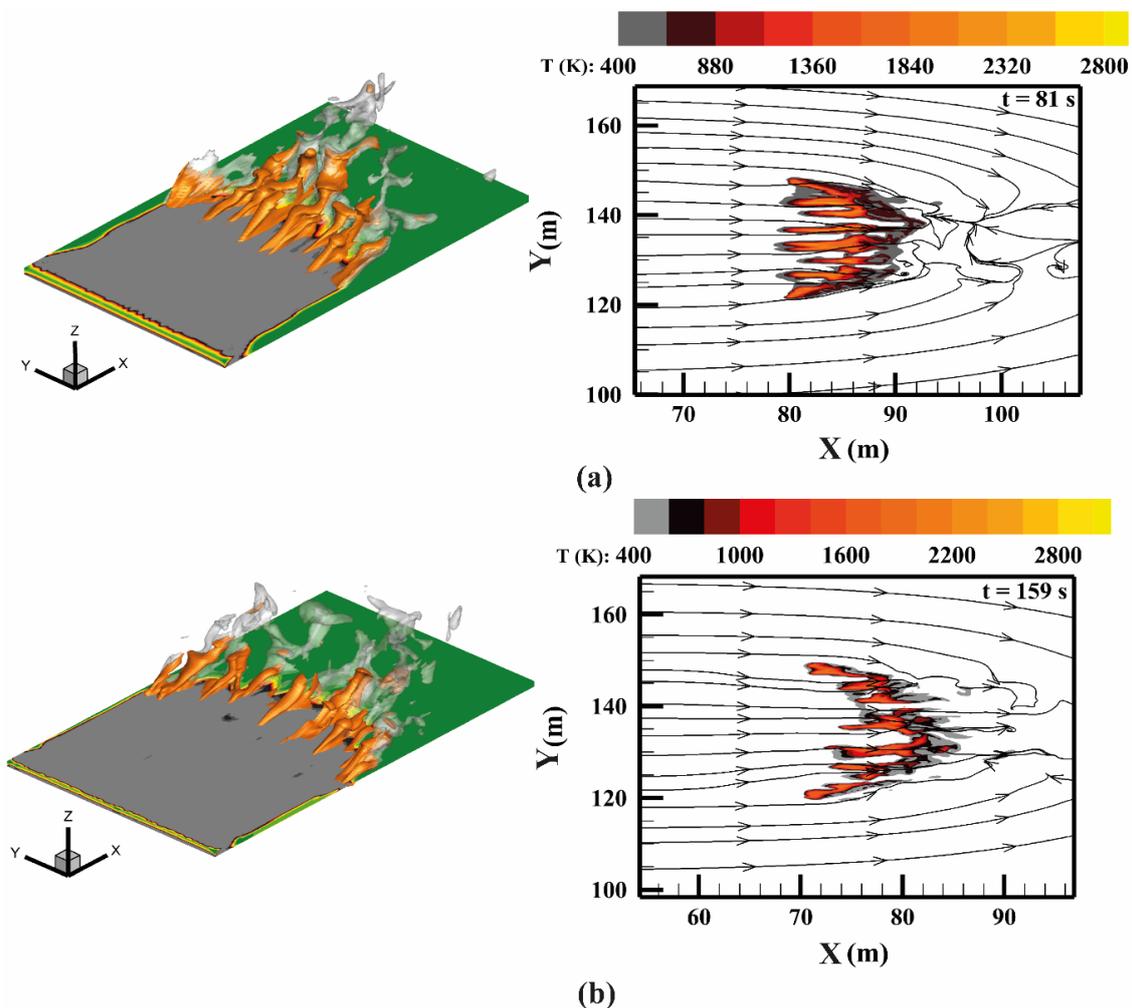
pour les trois expériences du terrain, donnent des erreurs d'environ 11%, 23,6% et 45% par rapport aux résultats expérimentaux. La surestimation des ROS obtenus avec FireStar2D peut être due à différentes causes. D'une part, l'approche 2D considère une ligne de feu infinie se propageant à la même vitesse sur toute la largeur du domaine. Ce qui n'est pas le cas pour ces configurations, où la forte pente déforme rapidement le front de flammes qui adopte une géométrie en pointe. D'autre part, dans le modèle 2D, l'effet du vent sur la trajectoire de la flamme est surestimé, car la flamme est considérée comme une barrière thermique uniforme qui dévie le flux d'air verticalement. La figure V-4 montre le champ de température évalués avec FireStar2D à un instant donné, ainsi que les lignes de courant décrivant la trajectoire des flux d'air déviés par la flamme. Ce phénomène contribue à augmenter l'inclinaison de la flamme par rapport au sol, augmentant ainsi le transfert de chaleur entre le front de feu et la végétation non brûlée, ce qui entraîne une surestimation de la vitesse de propagation.



*Figure V-4. Champs de températures et lignes de courants obtenus avec FireStar2D (Mars 2021)*

En revanche, avec FireStar3D, les conditions de frontière ouverte appliquées sur les deux côtés latéraux du domaine avec une largeur de front de feu finie, induisent des flux latéraux

et provoquent un ralentissement du feu près des côtés (figure V-5). Dans ce cas, le point le plus avancé du front reste dans la partie centrale tout au long de la simulation. En outre, l'utilisation de FireStar3D permet de restituer les effets 3D observés dans les incendies réels, et ainsi mieux représenter l'hétérogénéité du périmètre du feu. En effet, un front de flammes est formé par une succession de pics et de creux qui permettent au vent de le traverser (figure V-5) [285,286]. Cette prise en compte de l'interaction du vent avec les flammes conduit à une représentation numérique plus réaliste de la propagation et du comportement de l'incendie.

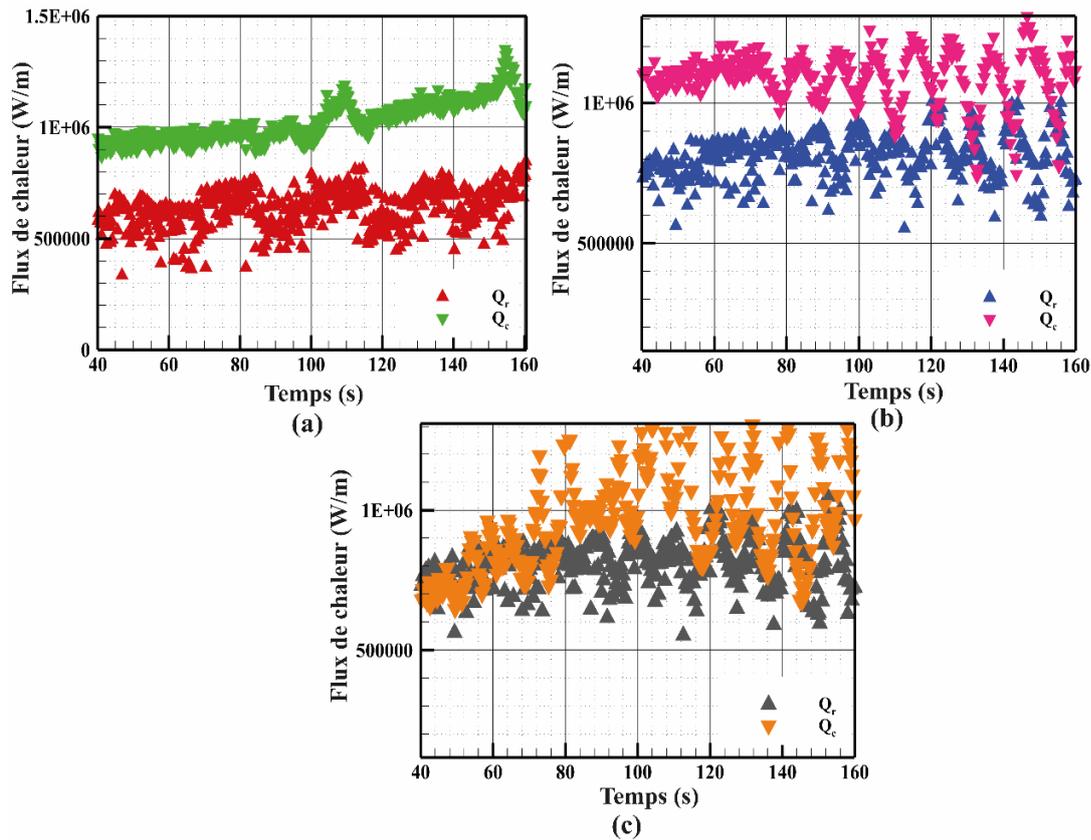


**Figure V-5.** Évaluation 3D du front de feu pour une surface isotherme  $T = 1000\text{ K}$  (à gauche), et vue du dessus représentant les champs de températures et les lignes de courant de la phase gazeuse obtenus dans le plan horizontal ( $z = e\text{ (m)}$ ) (à droite) : (a) Octobre 2021 ; (b) mars 2022

En ce qui concerne la comparaison des valeurs expérimentales du ROS, la vitesse de propagation la plus élevée a été obtenue durant la première expérience (Speluncatu mars 2021).

Les conditions de propagation lors de ces feux expérimentaux concernant la végétation (charge, FMC), ainsi que les conditions météorologiques, en particulier la vitesse du vent ambiant, étaient presque du même ordre de grandeur pour les trois expériences. En revanche, la pente du terrain était différente. En effet, le premier site avait une pente plus importante ( $28^\circ$  équivalent à 53%) que les deux autres ( $22^\circ$  et  $16^\circ$  équivalents à 40% et 29% respectivement). Cela explique les valeurs du ROS trouvées expérimentalement avec une vitesse de 0,45 m/s lors du premier feu et des valeurs moins élevées pour les deux autres expériences (0,38 m/s et 0,2 m/s).

La topographie est un facteur qui influence les modes de transfert de chaleur entre la flamme et la végétation. De fait, la pente du terrain joue un rôle très important dans le comportement du feu [103,220,287]. L'effet d'une pente sur la dynamique du front de flammes est assimilé à la présence d'un vent supplémentaire [288,289]. La présence d'une pente induit un gradient de pression entre la zone brûlée et la zone non brûlée en raison des changements dans la capacité d'entraînement de l'air. Ce phénomène favorise l'attachement de la flamme au sol, qui sera renforcé par une composante de la force de flottabilité. Cette force agit dans la direction opposée à la composante de la force d'attraction gravitationnelle  $g_x$ , agissant dans la direction X négative, résultant de l'inclinaison du terrain. Par conséquent, la flamme s'incline davantage vers le sol, ce qui augmente le contact, ainsi que le transfert de chaleur convectif entre les gaz chauds et la végétation non brûlée. Cela favorise le préchauffage de cette zone et accélère la vitesse de propagation du front de flammes. Des résultats obtenus avec FireStar2D montrent l'évolution temporelle du flux total de chaleur dû au rayonnement et à la convection entre les flammes et la végétation, calculée sur l'ensemble du domaine (figure V-6). Ces résultats montrent que pour ces expériences, la convection est le mode de transfert de chaleur dominant, surtout dans les deux premières, où la pente du terrain était plus élevée, à  $28^\circ$  et  $22^\circ$  respectivement.



**Figure V-6.** Évolution dans le temps du transfert de chaleur radiatif et convectif entre la flamme et la végétation évalué sur firestar2D : (a) Speluncatu (Mars 2021) ; (b) Speluncatu (Octobre 2021) ; (c) Letia (Mars 2022)

## V.2 Intensité du feu

Les valeurs expérimentales des intensités du front de flammes sont obtenues en appliquant la formulation de Byram (Eq. IV.5), où la fraction de la masse du combustible brûlé  $\mu$  est évalué pour chaque expérience. Par exemple, lors de l'expérience de Speluncatu (mars 2021), les échantillons prélevés sur le site pour estimer la charge surfacique étaient principalement constitués de particules fines de moins de 6 mm de diamètre, ainsi que de petites branches de diamètre plus important (entre 6 mm et 1 cm). La comparaison entre les parcelles avant et après brûlage montre que la masse brûlée était principalement constituée de particules fines (figure V-7). De ce fait, la valeur de  $\mu$  a été estimée à 0,7. En revanche, pour les deux autres expériences, l'échantillonnage de la végétation pour l'évaluation de la charge surfacique

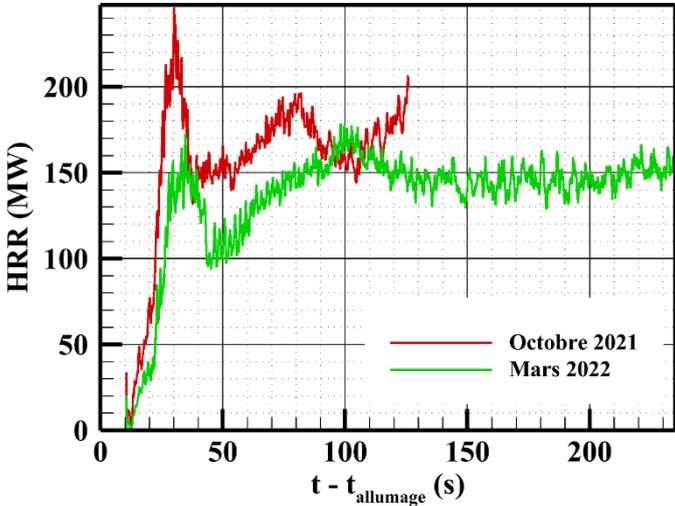
a été affiné, basé uniquement sur les particules fines. Par conséquent, la valeur de  $\mu$  a été prise égale à 1.



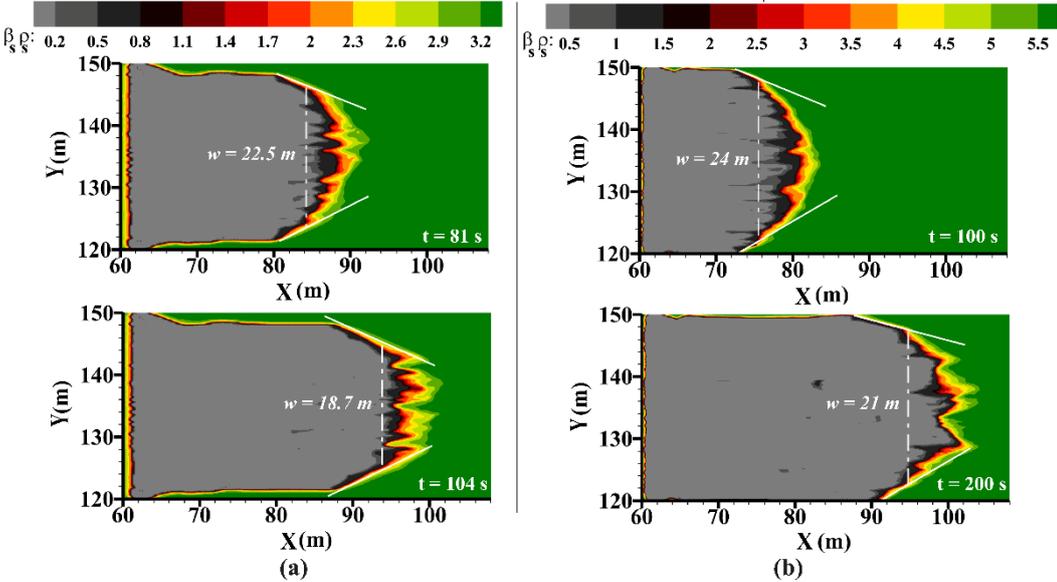
**Figure V-7.** Parcelle : (a) avant le brûlage et (b) après le brûlage, permettant une estimation visuelle du pourcentage de combustible consommé par le feu

Numériquement, avec FireStar3D, l'intensité du front de flammes est basée sur le calcul du  $HRR$ . La figure (V-8) montre la variation dans le temps du taux de dégagement de chaleur pour les deux expériences de Speluncatu (Octobre 2021) et Letia (Mars 2022). Selon l'équation (IV.8), la largeur du front de feu doit être estimée afin de calculer la valeur de l'intensité par unité de longueur du front de flammes. Pour un feu se déplaçant linéairement avec une vitesse quasi-constante sur toute la ligne du front,  $w$  doit être égal à la largeur initiale de la ligne d'allumage (30 m pour ces expériences de terrain (figure IV-2)). Cependant, lors de feux expérimentaux à l'échelle du terrain, la propagation s'effectue sur un terrain en pente ce qui engendre un front de flammes arrondi qui tend à se rétrécir dans le sens de la pente [155]. Numériquement, l'application des conditions aux limites qui considèrent une frontière ouverte sur les côtés latéraux du domaine, permet de reproduire les conditions réelles de propagation, et d'obtenir un front de feu de forme parabolique. Dans ce cas, on suppose que  $w$  est égal à la largeur de la partie la plus avancée du front de flammes qui contribue effectivement au  $HRR$ . La figure (V-9) montre les fronts de pyrolyse correspondant aux valeurs maximales et minimales des  $HRR$  dégagés pour les deux expériences du terrain étudiées sur FireStar3D.

Ainsi, l'intensité de la ligne de feu est évaluée en calculant la moyenne des valeurs maximales et minimales des intensités, obtenues à différents instants de la simulation.



**Figure V-8.** Variation dans le temps du taux de dégagement de chaleur (HRR) durant les expériences d'Octobre 2021 et Mars 2022, évalué sur FireStar3D



**Figure V-9.** Développement du front de flammes évalué sur FireStar3D durant les expériences du terrain : (a) Octobre 2021 ; (b) Mars 2022

Les valeurs de l'intensité évaluées selon les différentes approches expérimentale et numérique sont présentées dans le tableau (V-3).

**Tableau V-3.** Valeurs d'intensité expérimentale et numériques obtenues sur FireStar2D et 3D

	Mars 2021		Octobre 2021			Mars 2022		
	Expérience	2D	Expérience	2D	3D	Expérience	2D	3D
Intensité (MW/m)	10,6	7,7	12,7	9,9	8,4	10,4	9,5	7,1

L'intensité du front de flammes est un paramètre essentiel qui est utilisé comme un indice pour estimer la sévérité d'un feu et également prévoir les moyens de lutte à déployer [52]. Ce paramètre est une quantité qui ne peut pas être mesurée mais seulement estimée selon différentes approches expérimentales ou numériques comme celles présentées précédemment. En utilisant la méthode expérimentale pour calculer ce paramètre, la quantité de combustible consommé ( $w_a = \mu \sigma$ ) est difficile à connaître avec précision, en raison de l'incertitude liée à l'estimation de la charge du végétal qui contribue effectivement à la propagation lors du passage du front de flammes. Cette quantité de combustible est généralement estimée en effectuant la différence entre la végétation présente avant et après l'incendie. Dans la plupart des cas,  $w_a$  est supposé égal à la charge surfacique du combustible sec constitué des particules fines (diamètre  $< 6$  mm pour les particules cylindriques), qui sont normalement toutes brûlées durant l'expérience. Néanmoins,  $w_a$  doit exclure la combustion lente post-frontale qui peut se poursuivre longtemps après le passage du front [290]. Il est connu qu'il y a moins d'incertitude pour les végétations où dominent les particules fines, comme les arbustes, qui ont tendance à limiter la combustion lente derrière le front de flammes en mouvement [291]. Cependant, la quantité de combustible consommée est affectée par d'autres paramètres tels que la teneur en eau, en particulier lorsqu'elle dépasse 40 % [292], ainsi que la fraction volumique ou la porosité, qui jouent un rôle crucial dans le transfert de chaleur entre les flammes et la végétation à l'intérieur du lit de combustible [42]. En outre, la sévérité du feu et son effet sur le sol dépendent aussi du temps de résidence [50,60], lié également à la vitesse de propagation. Pour une valeur relativement élevée du ROS, comme dans la 1<sup>ère</sup> expérience de terrain (ROS = 0,45 m/s), une combustion d'une partie de la strate végétale peut avoir lieu. Dans ce cas-là, moins de

combustible sera brûlé lors du passage du front de flammes, par rapport à un incendie se déplaçant plus lentement [293]. Pour toutes ces raisons, considérer que  $w_a$  est égal à la charge totale du combustible sec dans l'évaluation expérimentale, conduit à une surestimation de l'intensité  $I_{BExp}$ .

Cependant, quelle que soit la méthode d'évaluation, les valeurs numériques et expérimentales obtenues font référence à des feux de surface de forte puissance selon les critères mentionnés dans la section (I.5.2.4), et ceci, malgré des conditions normalement défavorables au développement de tels feux, comme des teneurs en eau relativement élevées (65%, 56% et 51%) et des vitesses de vent faibles ( $U_3 = 1,98$  et  $1,3$  m/s). Ces incendies peuvent s'avérer extrêmement difficiles à contrôler dans le cas de phénomènes réels similaires. En effet, il est ainsi préconisé que les actions de lutte doivent être limitées à l'arrière et aux côtés de l'incendie car les efforts directs pour contrôler le feu dans son axe de propagation principal sont susceptibles d'échouer [119,122] .

### **V.3 Flux thermiques et impact du feu**

L'impact du feu sur une cible a été évalué à différentes positions en amont du front de flammes. Pour cela, les flux de chaleur radiatifs et totaux reçus par des capteurs situés en haut des parcelles ont été enregistrés lors des expériences. Au cours de la campagne de brûlage qui a eu lieu en Octobre 2021, les feux sur les côtés mis en œuvre par les pompiers pour sécuriser la zone de brûlage étaient proches des capteurs, ce qui a affecté les mesures pendant l'incendie. C'est la raison pour laquelle seuls les flux de chaleur mesurés pendant les expériences de mars (2021 et 2022) ont été étudiés et comparés aux prédictions numériques.

Lors de ces expériences, les flux thermiques radiatifs et totaux reçus par les capteurs ont été enregistrés. L'analyse des données a été effectuée jusqu'à ce que le front de feu atteigne l'extrémité supérieure de la parcelle. Les cibles étaient placées aux endroits P1, P2 et P3 comme mentionné sur la figure (V-10) et le tableau (V-4).

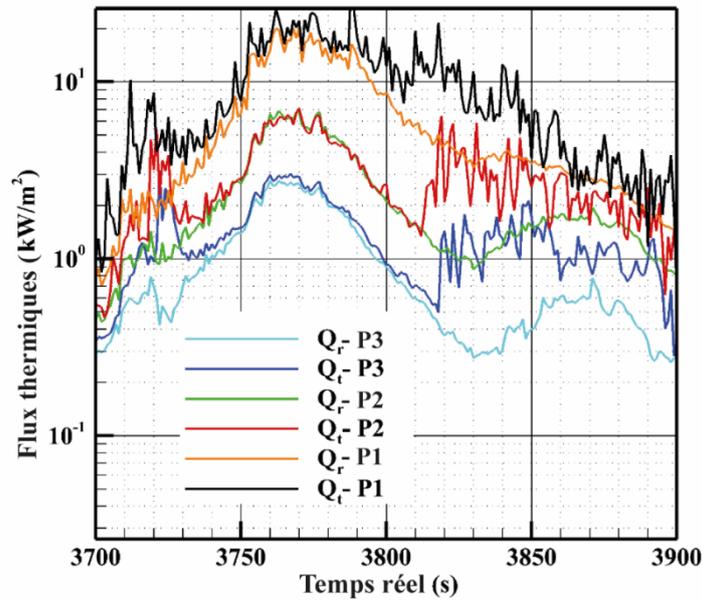
**Tableau V-4.** Positions des capteurs de flux en haut de la parcelle sur les sites expérimentaux de Speluncatu (Mars 2021) et de Letia (Mars 2022)

Distance de l'extrémité de la parcelle (m)	Octobre 2021			Mars 2022	
	P1	P2	P3	P1	P2
X (m)	6	11	16	6	10,5
Y (m)	0,5	0,5	0,5	2,3	3,7



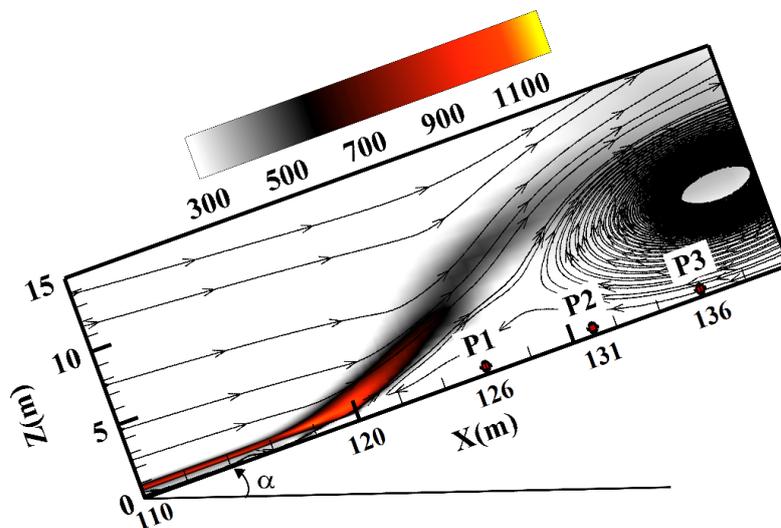
**Figure V-10.** Positions des fluxmètres radiatifs et totaux par rapport à l'extrémité de la parcelle (Letia Mars 2022)

Pour l'expérience de Speluncatu (Mars 2021), sur la figure (V-11), est représentée l'évolution temporelle des flux radiatifs ( $Q_r$ ) et totaux ( $Q_t$ ) reçus par les capteurs. Il est à noter que ces flux sont presque égaux lors d'une première phase qui est de l'ordre de 100 s pour les trois cibles. Ensuite, la différence entre le flux thermique total et le flux radiatif devient plus prononcée. Cela est dû à l'existence d'un phénomène de convection à l'avant du front de flammes.



**Figure V-11.** Variation dans le temps des flux radiatifs et totaux reçus par les capteurs lors de l'expérience de Speluncatu (Mars 2021)

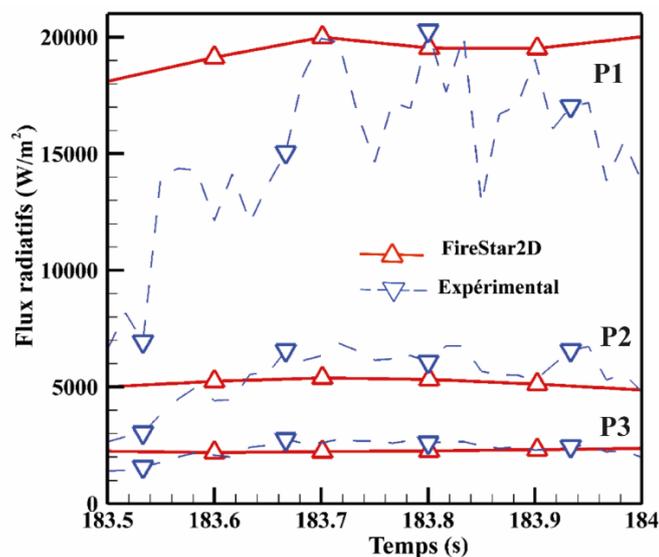
L'impact thermique de ce feu sur les cibles a été étudié numériquement à l'aide de fireStar2D (figure V-12).



**Figure V-12.** Champs de températures et lignes de courant obtenus numériquement quand le front de flammes atteint la fin de la parcelle

Les flux radiatifs numériques et expérimentaux présentés dans la figure (V-13), montrent presque des tendances identiques et surtout les mêmes niveaux de flux maximaux aux différents points cibles (P1, P2 et P3). L'écart entre les données expérimentales et l'évaluation numérique du flux radiatif, est plus prononcé à la position P1 (la plus proche du front de

flammes) et est principalement due au contact direct avec la flamme, alors que cet écart est beaucoup moins prononcé aux positions P2 et P3. La comparaison entre les flux convectifs expérimentaux et numériques a été évaluée par l'intermédiaire des ratios moyennés dans le temps du flux de chaleur radiatif par rapport au flux de chaleur total, estimé numériquement pour les trois fluxmètres (tableau V-5). Le tableau (V-5) montre que la contribution du rayonnement est dominante et dépasse 93% pour les deux points les plus éloignés (P2 et P3). Malgré le même ordre de grandeur, la contribution radiative à la position P2 dépasse celle à la position P3. Cette légère différence pourrait être due aux phénomènes de turbulence présents près de la dernière cible (figure V-12). Ces phénomènes de turbulence mettent la cible P3 en contact avec les gaz chauds de manière plus prononcée que pour le cas de la cible P2. Par conséquent, cela augmente le transfert de chaleur par convection, ce qui rend le rayonnement plus important à la position P2 qu'à la position P3.

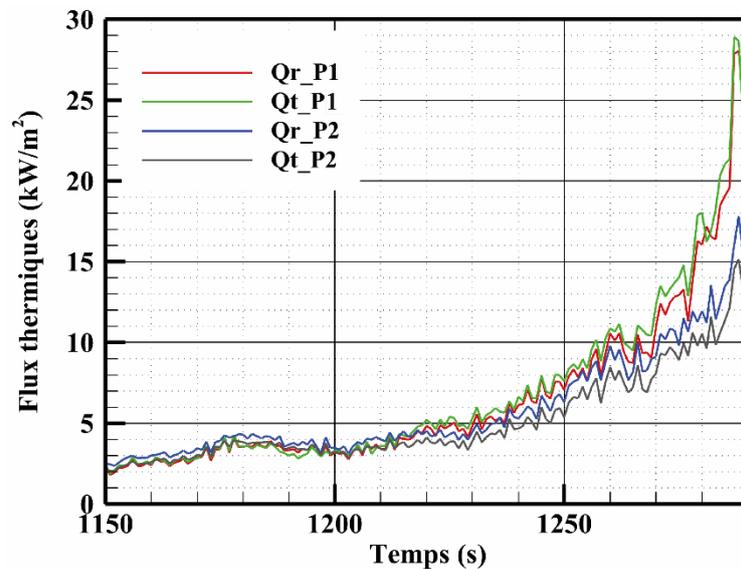


**Figure V-13.** Comparaison des flux radiatifs numériques (FireStar2D) et expérimentaux reçus par les capteurs lors de l'expérience de Speluncatu (Mars 2021)

**Tableau V-5.** Ratios moyennés dans le temps des flux de chaleur radiatifs par rapport aux flux totaux évalués expérimentalement et avec FireStar2D (Speluncatu Mars 2021)

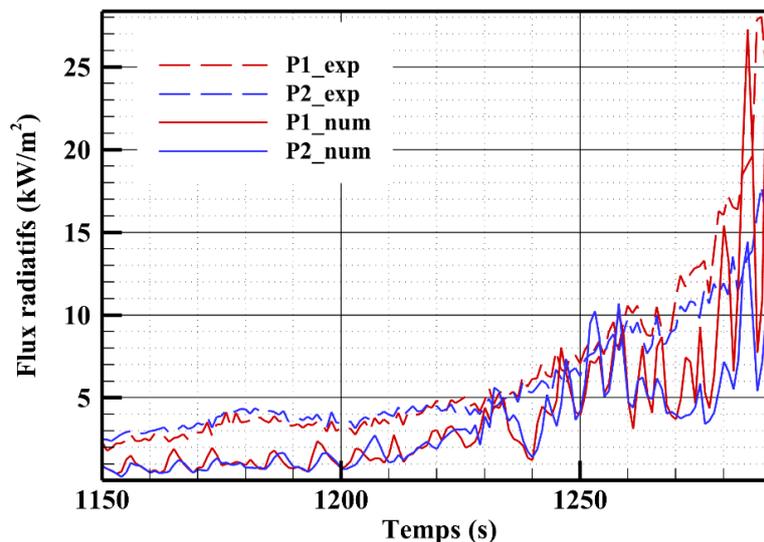
Position	$Q_r / Q_t$ FireStar2D	$Q_r / Q_t$ Expérience
P1	0,79	0,85
P2	0,99	0,97
P3	0,96	0,93

Concernant l'expérience de Letia (Mars 2022), les flux radiatifs et totaux enregistrés au cours de l'expérience par les capteurs (P1 et P2) sont représentés dans la figure V-14.



**Figure V-14.** Flux expérimentaux radiatifs et totaux enregistrés par les différents fluxmètres au cours de l'expérience de Letia (Mars 2022)

Numériquement, cet impact a été évalué avec FireStar2D et 3D. La comparaison des flux radiatifs numériques (FireStar2D) avec les mesures expérimentales est donnée par la figure V-15.



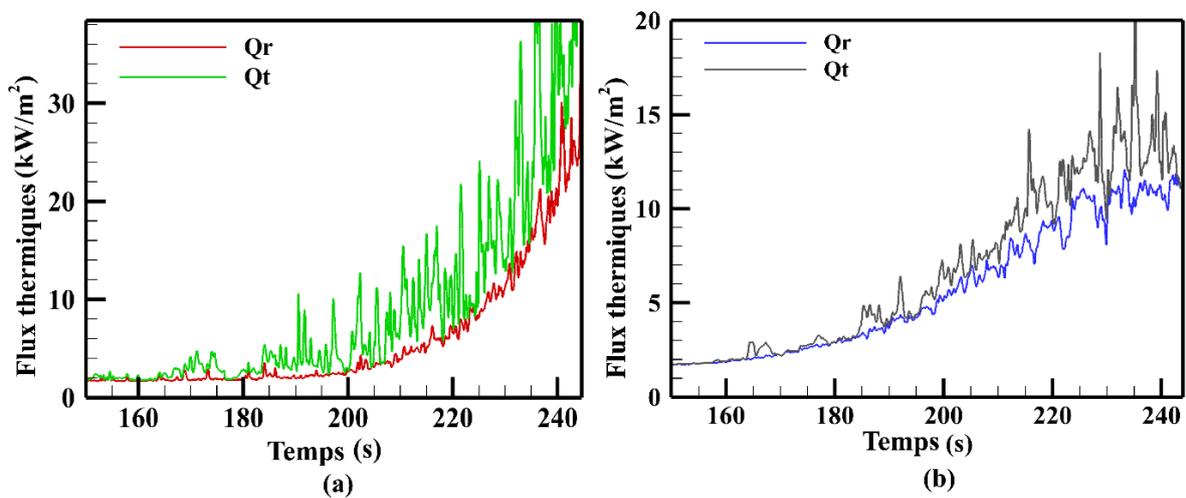
**Figure V-15.** Flux radiatifs évalués sur FireStar2D pour l'expérience de Letia (Mars 2022)

Pour la comparaison des flux radiatifs et totaux, les ratios de ces grandeurs, numériques et expérimentaux moyennés dans le temps, sont donnés dans le tableau (V-6) :

**Tableau V-6.** Ratios moyennés dans le temps des flux de chaleur radiatifs par rapport aux flux totaux évalués expérimentalement et avec FireStar2D (Letia Mars 2022)

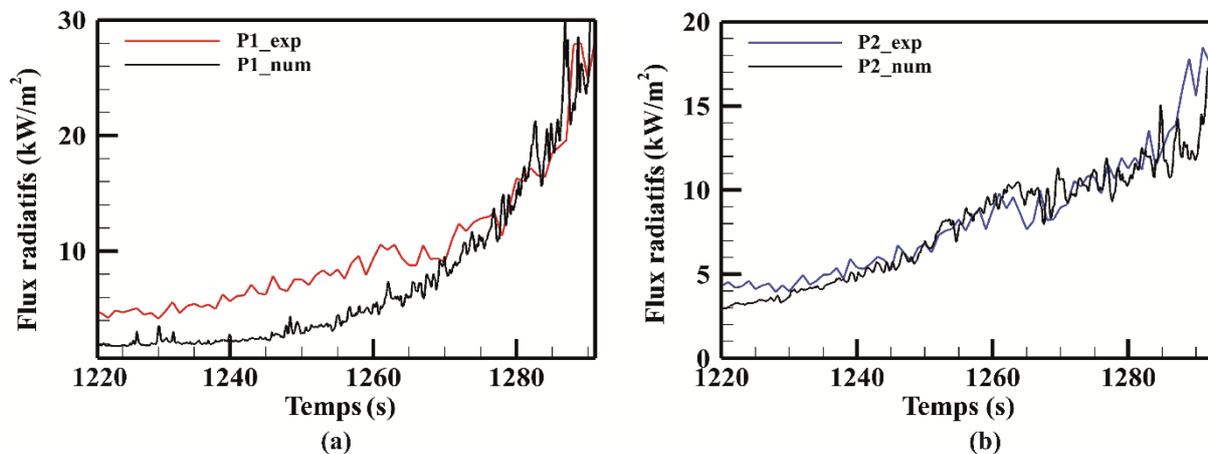
Position	$Q_r/Q_t$	$Q_r/Q_t$
	FireStar2D	Expérience
P1	0,92	0,94
P2	0,96	0,99

Concernant l'évaluation de l'impact à l'aide de FireStar3D, la (figure V-16) montre l'évolution dans le temps des flux radiatifs et totaux reçus par chaque capteur au cours de l'expérience. Cette représentation permet de comparer la contribution des modes de transfert de chaleur radiatif et convectif entre le front de flammes et les cibles.



**Figure V-16.** Variation dans le temps des flux numériques radiatifs et totaux évalués avec FireStar3D et reçus par les capteurs : (a) P1 ; (b) P2 (Letia Mars 2022)

La figure (V-17) représente une comparaison des flux radiatifs numériques et expérimentaux reçus par chaque capteur au cours de l'expérience :



**Figure V-17.** *Variation dans le temps des flux radiatifs expérimentaux et numériques (FireStar3D) reçus par les capteurs : (a) P1 ; (b) P2 (Letia Mars 2022)*

Les résultats numériques obtenus avec FireStar2D et 3D sur l'évaluation de l'impact du feu de Letia, montrent les mêmes tendances que les flux de chaleur radiatifs enregistrés au cours de l'expérience, et ainsi que des valeurs maximales quasiment égales (figure V-15 et figure V-17). Les résultats expérimentaux présentés dans la figure (V-14), montrent que la contribution radiative domine le mode de transfert de chaleur convectif. On retrouve cette conclusion pour les résultats 2D (tableau V-6), mais également pour les prédictions 3D (figure V-16), malgré les fluctuations des flux convectifs qui sont généralement liées aux composantes de vitesse, utilisées pour calculer ce paramètre. Ainsi, les méthodes numériques d'évaluation de l'impact du front de flammes sont cohérentes avec les mesures obtenues expérimentalement. Il est donc envisageable d'utiliser ces calculs numériques pour estimer, par exemple, des distances de sécurité [294] ou définir des zones de sécurité [295,296].

## **V.4 Géométrie de la flamme et périmètre du front**

La géométrie du front de feu comme la longueur, la hauteur et l'inclinaison des flammes sont souvent des quantités qui donnent des indications sur la dynamique du feu [117,297]. L'évaluation de ces caractéristiques peut également être très utile aux opérationnels pour la lutte contre les incendies afin d'évaluer l'impact du feu sur une cible [294,298], ou le dimensionnement des coupures de combustible [174,189]. Les caractéristiques de la flamme ont également été liées au transfert de chaleur pendant la propagation du feu [195] et à l'interaction du feu avec son environnement, comme la capacité d'entraînement de l'air, qui à son tour, affecte le comportement du feu et la géométrie de la flamme, en particulier son angle d'inclinaison [299].

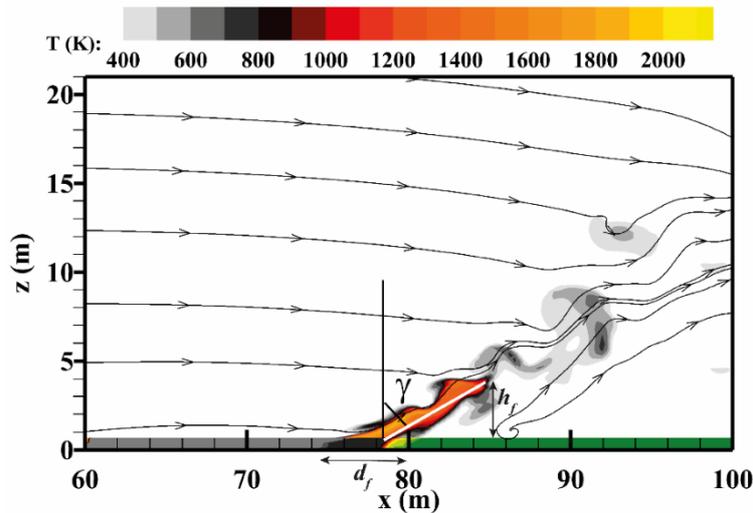
Dans cette étude, l'angle d'inclinaison de la flamme  $\gamma$  (figure V-18) a été évalué lors de l'expérience de Letia (Mars 2022), en utilisant les vidéos enregistrées par une caméra située sur

un côté latéral de la parcelle. En revanche, lors de la première expérience (Speluncatu Mars 2021), l'estimation visuelle de l'angle d'inclinaison de la flamme à l'aide de cette méthode n'a pas été possible en raison du brouillard épais qui était présent sur site. De même, cette technique fut impossible à appliquer lors de l'expérience de Speluncatu (Octobre 2021), en raison de l'importante fumée générée par le feu. La figure (V-18) montre l'angle d'inclinaison de la flamme  $\gamma$  mesuré expérimentalement lors de l'expérience de Letia, qui a été estimé entre le côté inférieur de la flamme visible et la perpendiculaire au sol. La parcelle est inclinée d'un angle  $\alpha = 16^\circ$  par rapport à l'horizontale. La valeur de l'angle d'inclinaison obtenue en faisant la moyenne sur sept mesures différentes conduit à  $\gamma = 40^\circ$ .



**Figure V-18.** Estimation visuelle de l'angle d'inclinaison de la flamme (Letia Mars 2022)

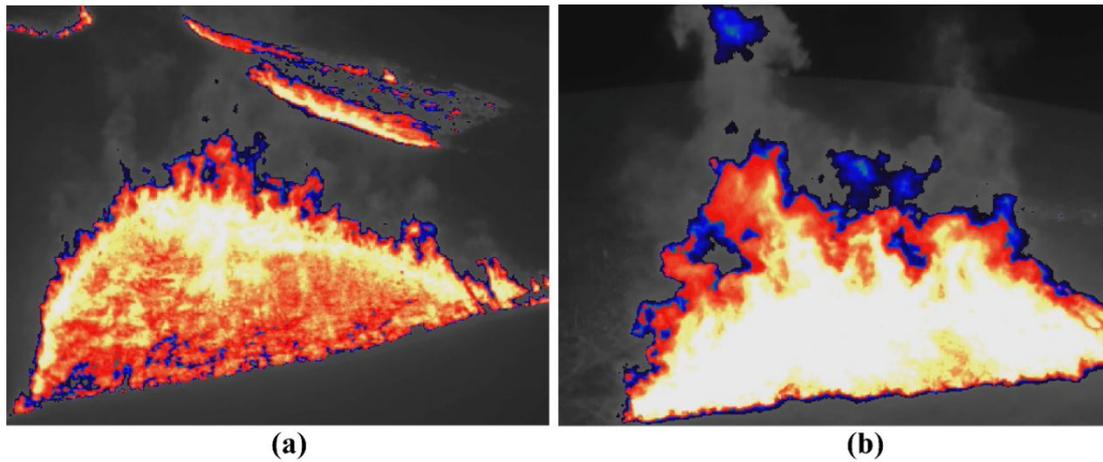
FireStar ne dispose pas encore d'une méthode numérique automatisée pour la détermination de la géométrie des flammes. Ainsi, l'angle d'inclinaison a été estimé géométriquement (moyenné sur plusieurs instants), en utilisant une isotherme de gaz chaud de valeur égale à 1000 K (figure V-19). Cette valeur seuil (1000 K) a été choisie car la température dans la flamme peut varier entre 1400 K à la base du front, et 700 K qui représente la température limite de visibilité de la flamme [300]. La valeur moyenne de l'angle d'inclinaison évalué à partir de différents instants de simulation est égale à  $48^\circ$  sur FireStar2D, et  $54^\circ$  sur FireStar3D.



**Figure V-19.** Estimation numérique de l'angle d'inclinaison de la flamme (Letia Mars 2022)

L'angle d'inclinaison de la flamme dépend de l'équilibre entre l'air ambiant qui se déplace dans la direction de propagation et la vitesse de flottabilité de la flamme [299,301]. Par exemple, lorsque la pente augmente, l'angle d'inclinaison de la flamme augmente de manière significative en raison de l'influence du vent induit par le feu. Le rapport hauteur ( $h_f$ ) / profondeur de la flamme ( $d_f$ ) (figure V-19), devient donc moins important. Les différentes valeurs de l'angle d'inclinaison trouvées numériquement, ainsi que l'écart par rapport aux mesures expérimentales, peuvent s'expliquer par les approches différentes utilisées pour évaluer l'intensité du front de flammes (tableau V-3). En effet, la valeur la plus importante de l'intensité du front de flammes est associée à la flamme la plus redressée et ainsi la valeur de  $\gamma$  la plus petite. De même, une intensité plus faible sera liée à une flamme plus penchée donc un  $\gamma$  plus grand.

Le périmètre du front de flammes a également été enregistré par les drones durant les expériences de Speluncatu et de Letia comme le montre les images IR dans les figures (V-1) et figure (V-20).



**Figure V-20.** *Images IR capturées par des drones pendant la propagation des feux expérimentaux réalisés en : (a) Octobre 2021 ; (b) mars 2022*

Les représentations numériques de la propagation du feu obtenues à l'aide de Firestar3D ont montré des fronts paraboliques (figures V-5, V-9), avec une largeur de front de feu limitée, similaires aux périmètres réels obtenus lors de ces feux expérimentaux. Ces simulations ont été menées en considérant des conditions aux limites ouvertes sur les deux côtés latéraux du domaine.

Le développement de la forme du périmètre de feu dépend de l'entraînement de l'air dans la zone de combustion, en particulier des flux d'air aspirés par les flammes et de la colonne de convection, depuis les côtés latéraux du combustible, dans une direction non parallèle à la propagation (figure V-5). Ainsi, l'écoulement doit converger vers le centre du combustible pour des raisons de symétrie [155]. Ceci explique pourquoi le feu dans l'axe principal de propagation se déplace plus rapidement que les côtés du front soumis à une plus grande décélération. Dans le cas d'un feu de forte intensité se propageant en pente dans des conditions de faible vitesse du vent, comme ce fut le cas dans ces feux expérimentaux, l'entraînement latéral de l'air devient plus important. Ainsi, le vent induit par le feu provenant de la zone brûlée derrière l'incendie devient plus fort en raison de la présence d'une pente. Cette combinaison augmente davantage la distorsion du front de flammes, avec une tête de feu de plus en plus pointue avec l'augmentation de la pente du terrain. La forme du front de flammes joue un rôle important sur

l'impact thermique sur des cibles en amont du front, car la quantité d'énergie provenant de ce dernier dépend du facteur de forme entre le front de flammes et la cible [117].

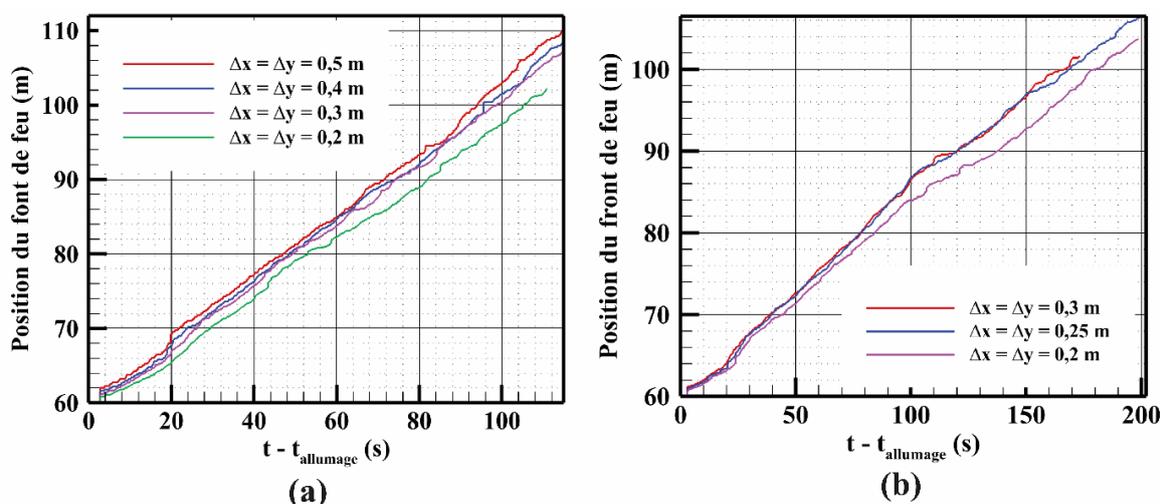
## **V.5 Tests de certains choix de paramètres**

### **V.5.1 Choix du maillage**

Le choix du maillage dans les codes physiques complets doit respecter certains critères liés à la structure de la végétation, notamment la longueur d'extinction comme mentionné précédemment (section IV.1.1) [55,56]. Dans FireStar2D, les dimensions des mailles choisies sont souvent 4 à 6 fois plus petites que cette longueur. Cela entraîne des résultats convergents et robustes. Malgré ce choix de maillage, FireStar2D reste rapide et opérationnel avec un temps de calcul beaucoup plus réduit que FireStar3D. En effet, une propagation d'un feu pendant 180 s modélisée sur FireStar2D, correspond à un temps de simulation de 24 h. Les temps de simulation correspondants aux calculs réalisés sur FireStar3D selon différentes dimensions de maillage, sont présentés dans le tableau (V-7).

En ce qui concerne les dimensions de mailles pour les deux expériences de terrain modélisées sur FireStar3D, elles sont choisies légèrement inférieures à la longueur d'extinction. Une étude de sensibilité a été menée pour tester des maillages plus fins et vérifier le choix des dimensions adoptées (tableau IV-2). Il est à noter que le maillage dans la direction Z est constant, et que le maillage dans la phase solide est uniforme et deux fois plus fin que pour la phase gazeuse dans tous les cas étudiés. La figure (V-21) montre la position du front de flammes en fonction de temps pour chaque cas testé. Les valeurs de ROS correspondantes sont présentées dans le (tableau V-7). Ces résultats montrent que pour les différents maillages testés, les valeurs de ROS obtenues sont proches, avec des erreurs relatives qui varient entre 13% et 2.6% par rapport aux ROS expérimentaux pour l'expérience de Speluncatu (Octobre 2021). Il en est de même pour l'expérience de Letia où les erreurs relatives entre les ROS numériques et expérimentaux varient entre 4,8% et 9,5%. Cela confirme la pertinence du choix du maillage

(tableau IV-2), qui permet d'obtenir ainsi des résultats cohérents avec l'expérience tout en essayant de réduire le plus possible le temps de calcul avec FireStar3D.



**Figure V-21.** Variation dans le temps du front de pyrolyse sur la surface du combustible obtenue par FireStar3D pour différents types de maillages : (a) Speluncatu Octobre 2021 ; (b) Letia Mars 2022

**Tableau V-7.** Valeurs de ROS obtenus sur FireStar3D pour différentes dimensions du maillage

Speluncatu (Octobre 2021) $\delta = 0,59$ (m)			Letia (Mars) $\delta = 0,32$ (m)		
$(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$ (m)	ROS (m/s)	Temps de simulation en 24 h (s)	$(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$ (m)	ROS (m/s)	Temps de simulation en 24 h (s)
(0,5 ; 0,5 ; 0,034)	0,43	15	(0,3 ; 0,3 ; 0,03)	0,21	8
(0,4 ; 0,4 ; 0,034)	0,41	10	(0,25 ; 0,25 ; 0,03)	0,20	5
(0,3 ; 0,3 ; 0,034)	0,41	6	(0,2 ; 0,2 ; 0,03)	0,19	4
(0,2 ; 0,2 ; 0,034)	0,39	3			

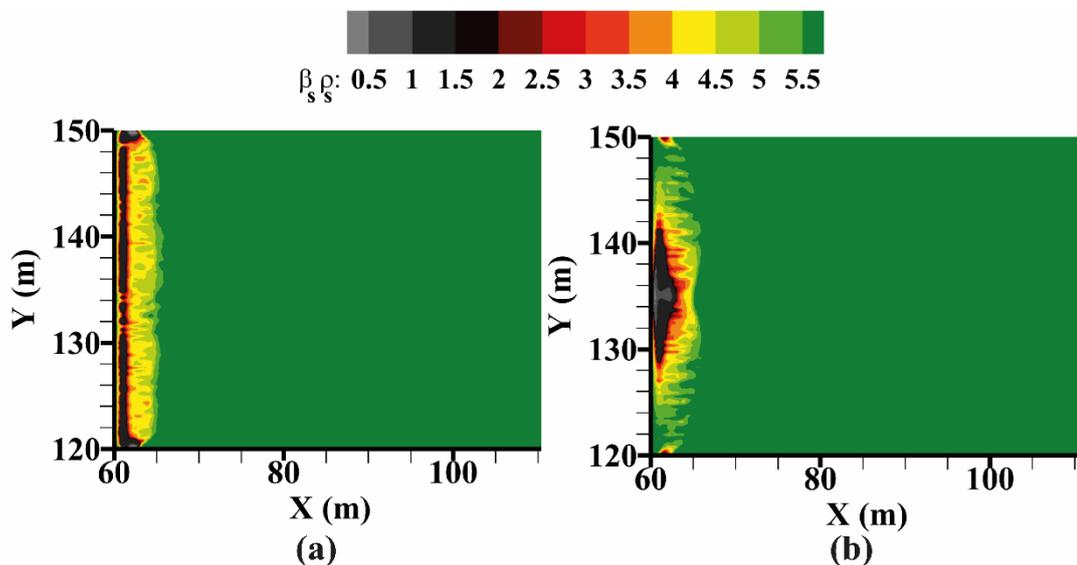
### V.5.2 Méthode d'allumage

La méthode d'allumage est un facteur qui peut jouer un rôle sur le comportement d'un feu expérimental. Ainsi, la méthode utilisée pour établir la ligne d'allumage peut affecter la forme du front de flammes ainsi que la vitesse de propagation [219,302]. Différents protocoles d'allumage peuvent être adoptés lors des expériences de terrain : l'allumage uniforme, qui consiste à mettre le feu instantanément sur toute la largeur de la parcelle ; l'allumage non-uniforme qui consiste à partir du centre de la parcelle jusqu'aux extrémités [258], et l'allumage à partir des deux extrémités de la parcelle pour ensuite rejoindre le centre du terrain [303]. Quel que soit le choix de la méthode d'allumage, il faut une parcelle assez grande pour obtenir un

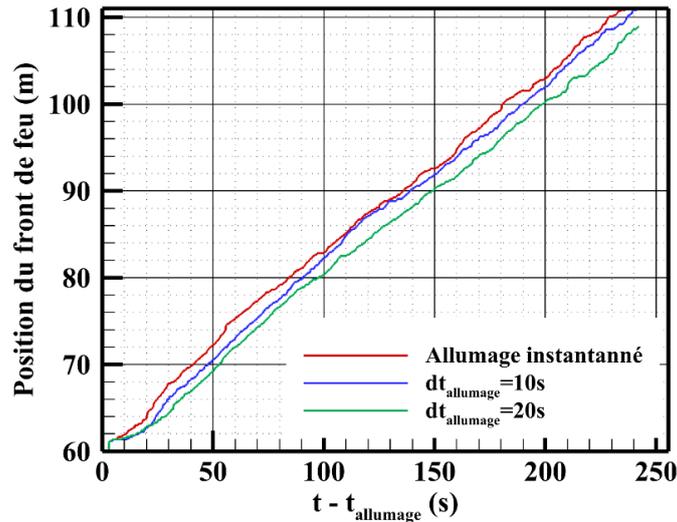
régime de propagation établi, et ainsi pouvoir évaluer la vitesse de propagation, une fois que l'incendie a atteint cet état.

Pour les deux expériences modélisées avec FireStar3D, un allumage instantané a été appliqué. Des tests numériques ont été conduits sur ce code physique complet afin d'étudier l'effet des deux types d'allumage différents (figure V-22) : allumage uniforme et non uniforme en partant du centre aux extrémités. Le dernier cas est similaire à la technique d'allumage utilisée lors des deux expériences du terrain (Spleuncatu Octobre 2021 et Letia mars 2022). Ces essais ont été réalisés sur la configuration de Letia (mars 2021) afin de vérifier l'effet de la méthode d'allumage sur la propagation du feu en considérant une longueur de parcelle de 60 m. Les grandeurs testées sont le ROS, la géométrie du front de flammes et l'intensité du feu.

La figure (V-23) montre la variation dans le temps de la position du front de feu sur la surface de la végétation pour un allumage non uniforme avec deux vitesses d'allumage différentes (10 s et 20 s pour allumer une ligne de feu de 30 m de large). Ces résultats sont comparés au cas de l'allumage instantané présenté précédemment (section Chapitre V).

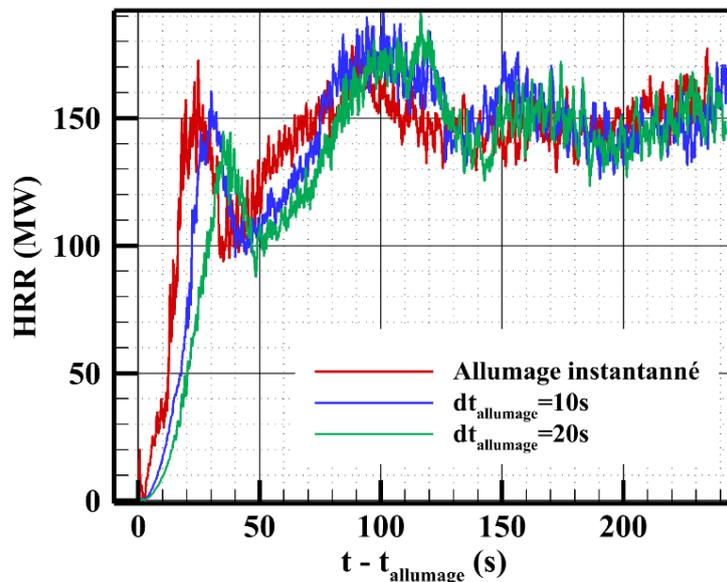


**Figure V-22.** Différents types d'allumage appliqués sur FireStar3D sur la configuration de Letia (mars 2022) : (a) instantané ; (b) non-uniforme

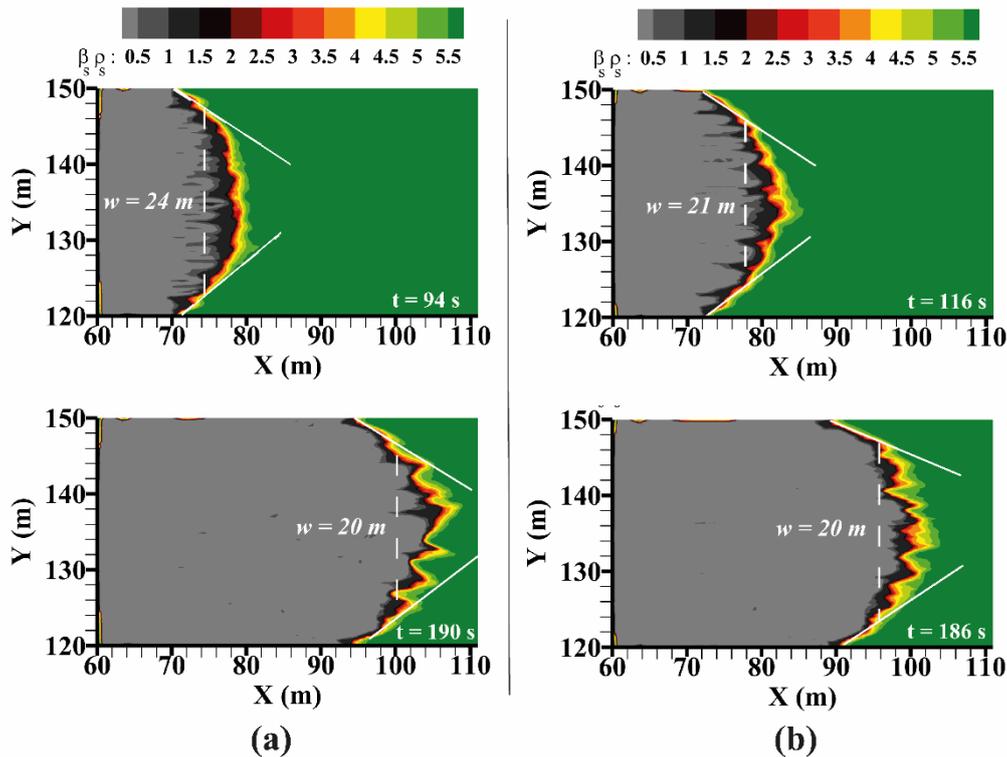


**Figure V-23.** Variation dans le temps du front de pyrolyse sur la surface du lit de combustible obtenu par FireStar3D pour différents types d'allumage (expérience de Letia Mars 2021)

La figure (V-24) retranscrit la variation du taux de dégagement de chaleur  $HRR$  évaluée avec FireStar3D pour les différents types d'allumage. La figure (V-25) montre les fronts de flammes qui correspondent aux valeurs maximales et minimales des  $HRR$  obtenues pour les deux cas d'allumage non uniforme, et qui permettent de calculer les intensités de ces feux selon l'équation (IV.8). Les valeurs de ROS et d'intensités de ces deux cas, comparées aux résultats obtenus pour le cas initial (allumage instantané), sont présentées dans le Tableau (V-8).



**Figure V-24.** Variation dans le temps du taux de dégagement de chaleur durant l'expérience de Letia, évalué sur FireStar3D pour les différents types d'allumage



**Figure V-25.** Développement du front de flammes durant l'expérience de Letia, évalué sur FireStar3D pour un allumage non uniforme : (a)  $dt_{\text{allumage}} = 10$  s : (b)  $dt_{\text{allumage}} = 20$  s

**Tableau V-8.** Valeurs de ROS et intensité obtenus sur FireStar3D pour différents types d'allumage (expérience de Letia)

Temps d'allumage $dt_{\text{allumage}}$ (s)	ROS (m/s)	Intensité (MW/m)
0 (allumage instantané)	0,2	7,1
10	0,2	7,2
20	0,19	7,6

La comparaison entre les comportements des feux générés par un allumage non-uniforme avec différentes vitesses, et un allumage instantané, montre des résultats très proches en termes de vitesse de propagation et d'intensité. Quelle que soit la méthode d'allumage utilisée, l'établissement du feu a eu lieu avec des valeurs de ROS similaires. Ces résultats justifient l'utilisation de l'allumage instantané lors de la simulation numérique de ce type de feux expérimentaux.

## V.6 Conclusions

Ce chapitre a pour but de présenter les différents résultats obtenus lors des trois campagnes de feux, réalisées à l'échelle du terrain, en hiver et en automne, à Speluncatu (mars

et Octobre 2021) et à Letia (mars 2022). Ces résultats expérimentaux ont été comparés aux prédictions des codes physiques complets FireStar2D et 3D. Pour étudier le comportement du feu, la vitesse de propagation et l'intensité du front de flammes ont été évalués. Les transferts de chaleur et l'impact du feu ont été également estimés, tout comme la géométrie de la flamme et du feu. Les résultats fournis par les deux approches numériques ont été en adéquation avec les mesures prises lors des expériences. Il est trouvé une meilleure précision dans la version 3D qui permet de modéliser plus finement les conditions réelles de propagation. La version 2D du code FireStar reste cependant intéressante car elle est plus rapide et donc plus opérationnelle, avec un temps de calcul inférieur à celui de FireStar3D.

Ces expériences mettent en évidence la possibilité du développement de feux de forte puissance, qui peuvent être très compliqués à contrôler, même en hiver ou en automne, lorsque les conditions de propagations ne sont pas favorables (vent faible, teneur en eau et humidité relative élevées). Cela confirme l'effet positif de la topographie du terrain (pente forte et modérée) et de la présence d'une végétation assez dense et homogène sur l'obtention de tels phénomènes, malgré des conditions météorologiques peu favorables. Les résultats numériques obtenus avec FireStar 2D et 3D laissent entrevoir la pertinence de l'utilisation de ce code pour la modélisation de ces feux de forte puissance. Ces codes permettront ainsi de simuler d'autres configurations sans avoir recours forcément à l'expérimentation. Ceci peut être d'une grande utilité pour les opérationnels, car les expériences à l'échelle du terrain sont souvent difficiles à réaliser et sujettes à plusieurs contraintes comme il a été mentionné précédemment (section III.2). L'utilisation de tels codes peut également s'avérer d'une grande utilité pour tous ceux qui désirent approfondir les connaissances sur la propagation et l'impact des feux de forte puissance, pour ensuite être utilisées par les opérationnels en phase de lutte, ou par ceux en charge de l'aménagement du territoire. Le but est donc de réduire le risque incendie, comme

par exemple, lors du dimensionnement des coupures de combustible ou des zones de sécurité.

Le dimensionnement de tels ouvrages sera abordé dans le chapitre suivant.

# Chapitre VI. Expertise scientifique sur Sari-Solenzara

---

## VI.1 Contexte général

Plusieurs communes de Corse (Evisa, Cargiaca, Sari-Solenzara...) ont fait remonter leurs craintes en ce qui concerne le dimensionnement des zones aménagées autour des habitations, définies par les Obligations Légales de Débroussaillage (OLD), dans le nouveau contexte climatique que connaît la région méditerranéenne. Ainsi, la Direction Régionale de l'Alimentation et de l'Agriculture et de la Forêt de Corse, a pris contact avec les chercheurs du projet GOLIAT afin de réaliser une étude à partir d'un scénario critique de feu de forte puissance pouvant s'inscrire dans la thématique des feux extrêmes étudiés dans ce projet de recherche.

L'objectif de cette étude avait pour but de montrer la pertinence d'un appui scientifique pour estimer l'efficacité des zones de débroussaillage autour des habitations, dont les dimensions sont jusqu'à présent fixées réglementairement sur la base de recommandations formulées par des experts.

Les enjeux de cette étude sont donc étroitement liés aux dommages potentiels causés par les feux de forêt de forte puissance, sur les habitations et les individus, qui peuvent être affectés par ces phénomènes naturels dans un contexte mondial et local, où ce type d'incendies est de plus en plus fréquent avec la problématique du réchauffement climatique [134].

L'étude scientifique et la méthode proposée par les membres de l'Université de Corse et leurs partenaires de Marseille, Toulon et du Liban doit permettre aux opérationnels de disposer d'informations sur la puissance de feu et son impact sur des cibles préalablement définies, selon plusieurs approches théoriques (physique simplifiée, physique complète, empirique), et dans des conditions considérées comme "critiques". Dans ce but, des secteurs "à risque" ont été identifiés au préalable avec les opérationnels (figure VI-1) dans plusieurs communes corses lors de différentes visites. Le site choisi se situe dans la commune de Sari-Solenzara sur la côte Est de la Corse du Sud. L'étude de ce « cas test » a été réalisée en étroite collaboration avec les opérationnels surtout lors du choix des modèles de végétation et des conditions météorologiques imposées pour le « cas critique ».

Cette étude se divise en deux parties qui sont présentées par la suite : la première porte sur l'évaluation de la dynamique du front de flammes, et la seconde est dédiée à l'étude de l'impact du feu sur des cibles.



**Figure VI-1.** *Visite sur la commune de Sari-Solenzara avec les opérationnels*

## **VI.2 Étude de la dynamique du feu**

### **VI.2.1 Caractéristiques du « cas critique » étudié**

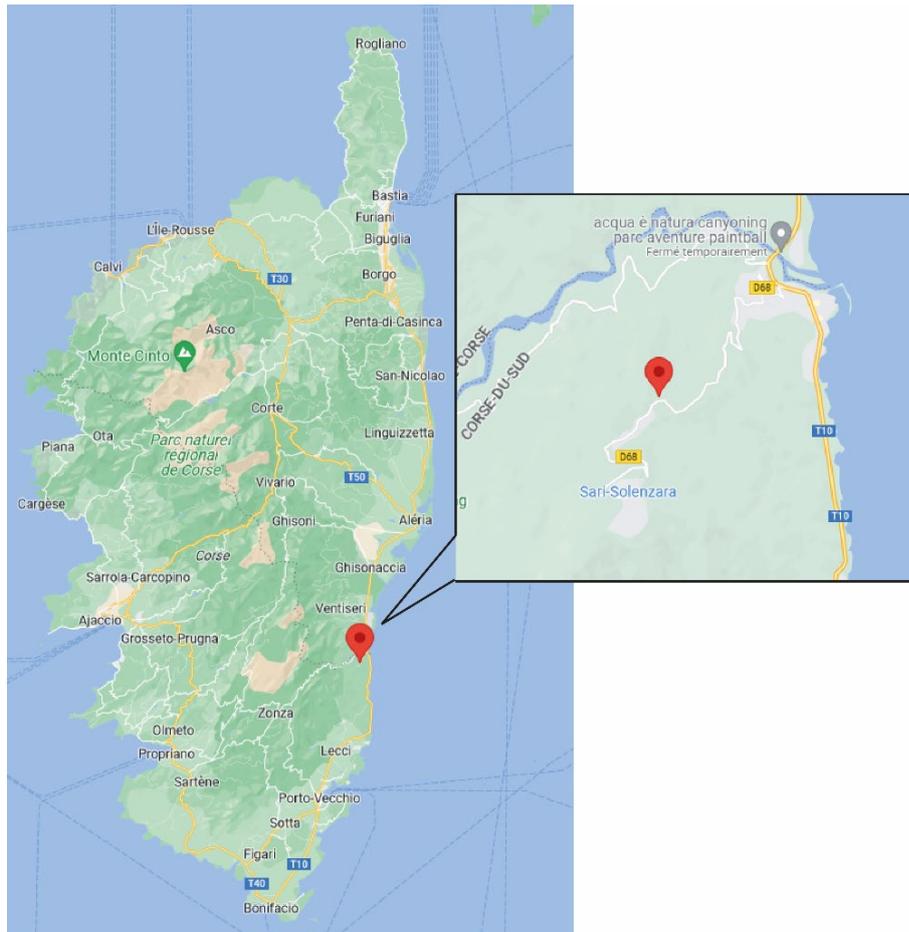
#### ***VI.2.1.1 Description du site***

La Corse constitue une zone d'étude de premier plan pour la recherche sur le risque incendie. Sur cette île, on estime que sur 360 villages ou villes, environ 200 sont exposés au

risque incendie et ont une forte probabilité que de tels événements affectent les personnes, les habitations et les infrastructures [304]. La vulnérabilité aux feux de forêt dans cette région n'est pas seulement due au changement climatique, mais aussi aux caractéristiques de la végétation (type et couverture). En effet, la croissance de la végétation due à l'abandon des terres a pour conséquence l'augmentation des superficies recouvertes par un combustible dense et inflammable [305]. Le risque augmente pendant les périodes d'été avec la croissance de la population dans cette région touristique populaire. La population dans les agglomérations double et la fréquentation humaine augmente dans les zones isolées sujettes aux incendies (activités de plein air en forêt ou en montagne, campings en pleine nature, parkings en bord de mer, etc.) [306]. Ainsi, le site sélectionné sur la commune de Sari-Solenzara (41°50'13" N 9°22'23" E) (figure VI-2), représente un exemple intéressant d'interface forêt-habitat (WUI<sup>5</sup>). En effet, ce site a la particularité d'avoir une maison au sommet d'un terrain incliné couvert d'une végétation dense composée d'arbustes hauts (figure VI-2). La pente du terrain a été évaluée à l'aide de mesures GPS effectuées sur place. Une valeur moyenne de 12° a été obtenue le long de l'axe principal de la parcelle.

---

<sup>5</sup> WUI : Wildland Urban Interface



**Figure VI-2.** Localisation du site choisi sur la commune de Sari-Solenzara



**Figure VI-3.** Couvert végétal et emplacement de la cible sur le site choisi

### **VI.2.1.2 Caractérisation du couvert végétal et météorologie**

Ce site a été sélectionné pour l'apparente structure homogène de sa végétation (couverture > 90 %), principalement composée de maquis arboré hauts de 4 m de haut. Une modélisation la plus réaliste possible de la végétation est essentielle pour prévoir correctement

le comportement des feux de forêt et estimer leurs impacts sur des cibles. Un modèle de combustible, utilisé dans des études précédentes [59,212], a été adapté pour prendre en compte la zone arbustive locale présente sur le site de l'étude, afin d'être utilisé comme données d'entrée des modèles physiques. Les caractéristiques physiques et thermochimiques des particules vivantes et mortes formant cette végétation sont présentées dans le tableau (VI-1). Ces caractéristiques ont été déterminées à partir d'un échantillonnage sur le terrain pour une végétation de type arbuste similaire au combustible présent sur le site choisi pour cette étude. En ce qui concerne les conditions météorologiques, il a été décidé, en consultation avec les membres du Groupe Technique Interdépartemental (GTI) du PFFENI (Plan de protection des Forêts et des Espaces contre les Incendies), d'appliquer des conditions particulières appelées "cas critiques". Ces conditions sont choisies parce qu'elles sont supposées être favorables à la propagation d'un feu de forte puissance. Ainsi, l'intensité du vent a été supposée constante et égale à 60 km/h (16,7 m/s) à 10 m au-dessus du sol. La direction du vent a été choisie le long de la direction principale de la pente (figure VI-3). La température et l'humidité relative de l'air ambiant sont celles d'une période chaude et sèche, et sont fixées à 35°C et 20%, respectivement.

**Tableau VI-1.** *Modèle de végétation : principales propriétés des particules mortes du maquis arboré corse ainsi que les caractéristiques des particules vivantes du combustible, mentionnées entre parenthèses*

Région	Type	Hauteur $e$ (m)	Charge surfacique sèche $\sigma$ (kg/m <sup>2</sup> )	Rapport surface / volume $s$ (m <sup>-1</sup> )	Teneur en eau $m$ (%)
Corsica	Maquis arboré	4	0,89 (1,79)	5544 (4766)	8 (100)
	$\rho_{sec}$ (kg/m <sup>3</sup> )		$C_p$ (J/kg/K)		$\Delta H_c$ (kJ/kg)
	720		1912		19 640

## VI.2.2 Implémentation dans les modèles physiques

### VI.2.2.1 Modèle physique complet : FireStar (2D et 3D)

Les domaines et méthodes de calcul numériques avec le code physique complet des deux versions de FireStar (2D et 3D), sont présentés en détail dans les sections précédentes. Pour FireStar3D, des conditions périodiques sont appliquées sur les côtés latéraux du domaine de calcul, afin de modéliser un front de flammes infini. Bien que ces modèles puissent prendre

en compte différentes strates végétales et les caractéristiques de différentes espèces au sein de ces strates, il a été décidé de considérer un modèle de combustible équivalent afin de comparer les approches théoriques pour l'évaluation du comportement du feu. Par conséquent, une valeur moyenne pour chaque paramètre est donnée pour les particules de combustible mortes et vivantes. Cela revient à considérer qu'un modèle de végétation est équivalent à une seule espèce dans une strate homogène. Par exemple, la charge totale de combustible  $\sigma_t$  est égale à la somme des charges des particules fines mortes et vivantes, ce qui donne une valeur de  $\sigma_t = 2,68 \text{ kg/m}^2$  ( $\sigma_t = 0,89 + 1,79$ ). Ces charges sont également utilisées pour évaluer la distribution des particules mortes et vivantes dans la végétation (33,2 % de particules mortes et 66,8 % de particules vivantes). En ce qui concerne le rapport surface / volume, la valeur équivalente de ce paramètre est égale à  $s = 5024 \text{ m}^{-1}$  ( $s = 5544 \times 0,332 + 4766 \times 0,668$ ). Enfin, la teneur en humidité équivalente du combustible entre les particules fines vivantes et mortes est égale à  $m = 69,45\%$  ( $m = 8 \times 0,332 + 100 \times 0,668$ ). Tous les paramètres qui sont utilisés pour les simulations avec FireStar, relatives aux caractéristiques du combustible et aux conditions météorologiques et topographiques sont listés dans le tableau (VI-2).

**Tableau VI-2.** Principales propriétés moyennes de la végétation homogène, conditions météorologiques et topographiques

<b>Végétation</b>	
Teneur en eau, $m$ (%)	69,45
Hauteur de la végétation, $e$ (m)	4
Charge surfacique sèche, $\sigma_t$ ( $\text{kg/m}^2$ )	2,68
Fraction volumique, $\beta$	$9,3 \times 10^{-4}$
Rapport surface / volume, $s$ ( $\text{m}^{-1}$ )	5024
<b>Météo et topographie</b>	
Vitesse du vent ambiant, $U_{10}$ (m/s)	16,6
Température ambiante, $T_a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	35
Humidité relative, $RH$ (%)	20
Pente du terrain, $\alpha$ ( $^{\circ}$ )	12

#### **VI.2.2.2 Modèle physique simplifié : Balbi**

Le modèle physique simplifié de Balbi détaillé précédemment, prend en compte un seul type de végétation. Ainsi, lorsque plusieurs types de particules sont présents, une végétation

homogène équivalente doit être définie. Les caractéristiques de cette végétation équivalente reprennent l'essentiel de celles du végétal mort pour la masse volumique, le rapport surface / volume, la charge surfacique et la teneur en eau (tableau VI-1). La partie vivante de la végétation est prise en compte à travers la charge surfacique totale (somme des charges surfaciques du mort et du vivant, soit 2,68 kg/m<sup>2</sup>) et la fraction volumique qui est calculée à partir de cette charge. Ainsi, comme vu précédemment, en utilisant la formule  $\beta = \frac{\sigma}{e \times \rho_{sec}}$ , pour le calcul de de la fraction volumique, on obtient  $3,1 \times 10^{-4}$  pour le végétal mort et  $9,3 \times 10^{-4}$  pour la compacité totale (mort et vivant).

## VI.2.3 Approches théoriques et résultats

### VI.2.3.1 Dynamique du feu : ROS et intensité du front

Afin d'évaluer le ROS théorique de l'incendie qui se propagerait dans les conditions « critiques » définies dans cette étude, les modèles ci-dessous sont employés (tableau VI-3) :

**Tableau VI-3. Modèles utilisés pour évaluer le ROS**

Approche théorique	Conditions météorologiques – topographiques et modèle de végétation utilisés	Principales caractéristiques
FireStar2D	Vent à 10 m – prise en compte de la pente – modèle de végétation détaillé ou équivalent.	Modèle multiphasique [55,211,224,307] 2D.
FireStar3D	Vent à 10 m – prise en compte de la pente – modèle de végétation détaillé ou équivalent.	Modèle multiphasique [196,219,308] 3D.
Modèle de Balbi	Vent à hauteur du combustible – prise en compte de la pente – modèle de végétation équivalent.	Approche physique-simplifiée – N'est pas efficace pour le cas d'une propagation en pente sans vent [201–205].
Modèle de Catchpole <i>et al.</i> 1998	Vent à 2 m – pas de prise en compte de la pente – hauteur de la végétation.	Approche empirique [309].
Modèle de Anderson <i>et al.</i> 2015	Vent à 2 m – pas de prise en compte de la pente – prise en compte de la hauteur de la végétation – de l'humidité du combustible mort.	Approche empirique [248].
Règle des 10%	Vent à 10 m.	Approche empirique [310,311].

Règle des 3% - Modèle de « Valabre »	Vent à 10 m.	Approche empirique – Règle proposée par le opérationnels de la lutte dans le Sud de la France [312].
Modèle Canadien FBP	Dépend de l'indice de danger ISI qui est fonction du vent à 10 m, de RH et de $T_a$ – prise en compte de la pente - 17 végétations disponibles.	Approche empirique – initialement conçue pour de l'herbe mais préconisée pour des végétations du type : arbres épars ou maquis. Charge surfacique standard de 0,35 kg/m <sup>2</sup> mais des ajustements pour d'autres charges sont envisageables [288,313].

Les méthodes d'évaluation de l'intensité du front de flammes avec FireStar2D et 3D sont détaillées dans la section (IV.2.2). En ce qui concerne le modèle de Balbi et les approches empiriques, l'évaluation de l'intensité est basée sur la formulation de Byram dans laquelle  $w_a$  représente la charge surfacique du combustible mort (Eq. IV.5). Les résultats de ROS et intensités obtenues avec les différentes approches sont présentés dans le tableau (VI-4) :

**Tableau VI-4.** Valeurs de ROS et de l'intensité obtenues à l'aide des différentes approches

Approche théorique utilisée	ROS (m/s)	Intensité du front (MW/m)
<b>Approche physique multiphasique</b>		
FIRESTAR2D	1,9	44,6
FIRESTAR3D	1,94	62,5
<b>Approche physique-simplifiée</b>		
Modèle de Balbi	1,65	23,8
<b>Approche empirique</b>		
Modèle de Anderson <i>et al.</i> 2105	2,57	44,9
Modèle de Catchpole <i>et al.</i> 1998	2,36	41,3
Règles des 10%	1,67	29,2
Modèle Canadien FBP	1,5	26,2
Règles des 3%	0,5	8,7

### VI.2.3.2 Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques du front de flammes sont souvent des variables qui donnent également une idée sur la dynamique du feu [117,297]. Il existe de nombreuses études expérimentales dans la littérature qui établissent un lien entre ces caractéristiques et la puissance de feu [53]. L'étude de Sari-Solenzara fournit donc les principales caractéristiques

géométriques du front de flammes pour le « cas critique » considéré, en utilisant différentes approches théoriques.

Contrairement aux feux de laboratoire, qui sont bien instrumentés et de faible puissance, la détermination des caractéristiques du front de flammes pour les feux de terrain est compliquée, et nécessite la connaissance des méthodes utilisées pour évaluer ces caractéristiques. Par exemple, la longueur de la flamme peut être mesurée à partir de l'arrière, de l'avant du front de flammes, ou même à partir du milieu de la zone de combustion active. Cela peut donc conduire à des valeurs très différentes selon la technique de mesure adoptée. En particulier, si la flamme est fortement penchée vers le combustible. Il est donc important de garder à l'esprit que les résultats obtenus concernant la géométrie du front de flammes, sont étroitement liés aux techniques de mesure adoptées.

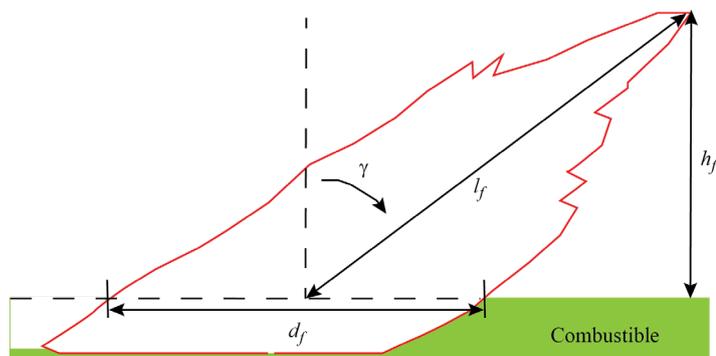
#### VI.2.3.2.1 Longueur de la flamme

Avec FireStar, la longueur de la flamme est évaluée géométriquement en fonction de la hauteur et l'angle d'inclinaison comme le montre la figure (VI-4), en se basant sur une isotherme de gaz chauds de température de 1000 K. Contrairement à la méthode choisie précédemment (section V.4) pour évaluer la géométrie de la flamme en prenant la mesure à partir de l'avant du front (figure V-19), la longueur est cette fois-ci mesurée à partir du centre de la zone de combustion (figure VI-4). Ceci montre que, comme il n'existe pas de méthode unique pour évaluer les paramètres géométriques du front de flammes, il faut veiller, lors de la comparaison des grandeurs, à ce que les valeurs soient toujours obtenues à l'aide de la même technique de mesure. Les propriétés de la flamme sont obtenues en calculant la moyenne de plusieurs mesures réalisées à différents instants durant la propagation (Eq. VI.1) :

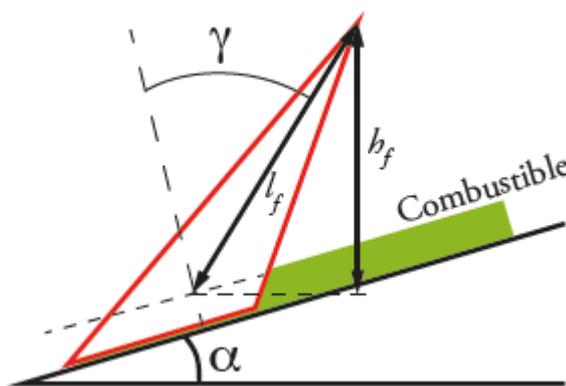
$$l_f = \frac{h_f}{\cos\gamma} \quad (\text{VI.1})$$

Avec  $l_f$  la longueur de la flamme,  $h_f$  la hauteur et  $\gamma$  l'angle d'inclinaison.

Pour le modèle physique simplifié de Balbi, la longueur de la flamme est également définie comme la distance entre le sommet de la flamme et le milieu de la zone active (figure VI-5).



**Figure VI-4.** Définition des paramètres géométriques de la flamme (convention « Byram »)



**Figure VI-5.** Définition des paramètres géométriques de la flamme utilisés dans le modèle de Balbi pour un feu se propageant sur un plan incliné

Les résultats concernant la longueur et la hauteur de la flamme, évalués avec les différentes approches physiques, sont présentés dans le tableau (VI-5) :

**Tableau VI-5.** Longueur et hauteur de la flamme, obtenues avec les différentes approches physiques

	Hauteur de la flamme $h_f$ (m)	Longueur de la flamme $l_f$ (m)
FIRESTAR2D	7,3	23,8
FIRESTAR3D	8,6	27,9
Modèle de Balbi	1,83	5,42

Dans le modèle de Balbi, il est encore possible de calculer la longueur de la flamme mesurée à partir de l'arrière du front, ce qui peut conduire à des valeurs beaucoup plus élevées,

surtout si la flamme est bien inclinée vers le combustible. La valeur de la longueur de flamme obtenue dans ce cas est de 16,03 m.

Les formules empiriques disponibles dans la littérature pour évaluer une longueur de flamme, sont pour la plupart basées sur une relation entre la longueur de flamme et l'intensité de Byram. Ces relations sont toutes de la forme :

$$l_f = aI_B^b \quad (\text{VI.2})$$

Où  $a$  et  $b$  sont des constantes déterminées à partir d'expériences et  $l_f$  est donnée pour une configuration représentée sur la figure (VI-4).

La première formule a été proposée par Byram en 1959 [314] pour de la litière de pin et a été largement utilisée depuis par les opérationnels à l'échelle du terrain [50,53]. De nombreuses autres formules ont été également proposées par d'autres chercheurs pour des combustibles et à l'échelle du terrain afin d'essayer de se rapprocher du cas des feux réels. Le tableau (VI-6) en donne une liste non-exhaustive ainsi que les résultats obtenus pour le cas étudié.

**Tableau VI-6.** Formules empiriques utilisées à l'échelle du terrain pour évaluer la longueur de la flamme et valeurs pour une intensité de Byram de 44,62 MW/m

Modèle $l_f = a I_B^b$	$a$	$b$	Domaine de validité $I_B$ (kW/m)	Combustible	Longueur de flamme (m)
Butler <i>et al</i> 2004 [315]	0,0175	0,6667	-	Forêt de pins "Jack"	22,02
Byram 1959 [314]	0,0775	0,46	56 - 2232	Litière d'aiguilles de pin	10,67
Catchpole <i>et al</i> 1998 [316]	0,0328	0,5586	100 - 7700	Maquis	12,97
Clark 1983 [317]	0,0007	0,9901	65 - 12602	Herbe	28,09
Fernandes <i>et al</i> 2009 [318]	0,049	0,54	30 - 3527	Forêt de pin maritime	15,89
Fernandes <i>et al</i> 2000 [319]	0,0517	0,4525	12 - 7605	Maquis	6,57
Nelson 1980 [320]	0,0377	0,5	5 - 3320	Sud des USA	7,96
Nelson et adkins 1986 [321]	0,0476	0,4926	98 - 2755	Litières et maquis	9,29
Van Wilgen 1985 [322]	0,0462	0,5128	194 - 5993	Maquis fynbos	11,19
Vega <i>et al</i> 1998 [323]	0,0872	0,4926	294 - 6905	Maquis	17,02

### VI.2.3.2.2 Inclinaison de la flamme

Comme pour la longueur de la flamme, l'angle d'inclinaison  $\gamma$  de la flamme est également évalué géométriquement avec FireStar2D et 3D, en moyennant sur plusieurs instants, à partir d'une isotherme de la température des gaz de 1000 K (figure VI-4).

Le modèle physique simplifié de Balbi calcule l'angle d'inclinaison (figure VI-4) grâce à un sous-modèle qui prend en compte la vitesse du vent, la pente du terrain et la vitesse ascensionnelle des gaz (Eq. II.94). Les valeurs de  $\gamma$  obtenues avec les modèles physiques sont représentées dans le tableau ci-dessous (tableau VI-7) :

**Tableau VI-7.** *Inclinaison de la flamme, obtenue avec les différents modèles physiques*

	<b>Inclinaison de la flamme (°)</b>
FIRESTAR2D	72
FIRESTAR3D	72
Modèle de Balbi	70,27

D'autres modèles dans la littérature permettent de calculer l'angle d'inclinaison d'un front de flammes. Le comportement de la flamme est souvent la conséquence de la compétition entre l'expansion verticale des gaz chauds au-dessus de la zone de combustion et le flux d'inertie induit latéralement par le vent [206]. Le rapport entre ces deux forces peut être représenté à l'aide d'un paramètre physique sans dimension, le nombre de Froude  $Fr$  (Eq. (VI.3)).

$$Fr = \frac{U_h^2}{gh_f} \quad (VI.3)$$

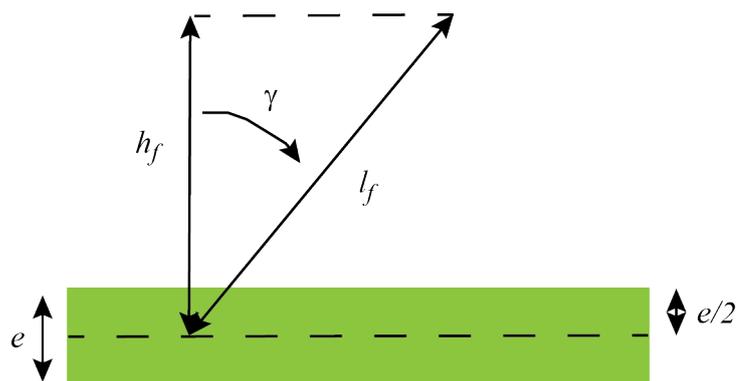
Où  $U_h$  est la vitesse du vent calculée au niveau de la hauteur de la flamme [324].

Des études théoriques et expérimentales [321,325,326] ont montré que l'angle d'inclinaison  $\gamma$  (figure VI-6), peut être estimé en utilisant la relation suivante :

$$\tan \gamma = a Fr^b \quad (VI.4)$$

Avec  $a$  et  $b$  des constantes calculées en fonction des hypothèses adoptées concernant les modes de transfert de chaleur entre la flamme et la végétation, mais également de l'échelle à laquelle

les feux se produisent (laboratoire ou terrain) (tableau VI-8). Par exemple, la première relation [325] est obtenue en utilisant un modèle théorique qui considère le rayonnement comme le mode de transfert de chaleur dominant entre la flamme et la végétation. C'est le cas pour des feux de forêt caractérisés par un faible nombre de Froude. Les deux autres corrélations [321,326] ont été établies à partir des feux de laboratoire et des feux de terrain. Les résultats expérimentaux obtenus pour des feux de terrain [321] ont montré que les feux de forêt pilotés par le vent et caractérisés par un nombre de Froude élevé ( $Fr \gg 1$ ) étaient beaucoup moins sensibles aux effets de la flottabilité, ce qui explique la différence de valeur de l'exposant  $b$  de l'équation (VI.4) (0,57 pour les feux de laboratoire de petite taille et 0,29 pour les feux de terrain de grande taille). Finalement, la relation proposée par Morvan [324], a été obtenu pour des nombres de Froude élevés ( $1 \geq Fr \geq 8$ ).



**Figure VI-6.** Définition des caractéristiques géométriques de la flamme (convention de « Thomas »)

**Tableau VI-8.** Modèles empiriques de calcul de l'angle d'inclinaison de la flamme

Modèle $\tan \gamma = a Fr^b$	$a$	$b$
Albini 1981 [325]	$\sqrt{3}/2$	0,5
Nelson et Adkins 1986 [321]	2,35	0,57
Weise et Biging 1996	0,89	0,29
Morvan 2007	2,11	0,2

D'autres approches pour évaluer cet angle d'inclinaison sont basées sur le nombre convectif de Byram  $Nc$  [327]. Le nombre de Byram est un paramètre qui représente le rapport entre la force de flottabilité de la flamme et la force exercée par le vent. Il est souvent utilisé comme indicateur du régime de propagation du feu. Des valeurs du nombre de Byram ( $Nc >$

10) sont normalement obtenues dans les feux pilotés par le panache, où le transfert de chaleur entre la flamme et la végétation non brûlée est dominé par le rayonnement. Alors que de faibles valeurs ( $N_c < 2$ ) sont obtenues dans les feux pilotés par le vent avec une contribution plus importante du transfert de chaleur convectif [324]. L'expression de ce paramètre est donnée par l'équation suivante (Eq. VI.5) :

$$N_c = \frac{2 g I_B}{\rho_0 C_{p0} T_a (U_{10} - ROS)^3} \quad (\text{VI.5})$$

Avec  $\rho_0$  la masse volumique de l'air et  $C_{p0}$  la capacité calorifique de l'air. La valeur de  $N_c$  obtenue en utilisant les simulations de Firestar2D est de 0,757.

Selon Nelson *et al.* (2012), l'angle d'inclinaison est donné par deux formules, adaptées pour les feux de laboratoire (Eq. VI.6) et ceux à l'échelle du terrain (Eq. VI.7) :

$$\tan \gamma = 3,85 \eta^2 N_c^{-\frac{2}{3}} \quad (\text{VI.6})$$

$$\tan \gamma = 0,655 \quad (\text{VI.7})$$

Avec  $\eta = 0,71$  pour  $N_c < 10$  et  $\eta = 1$  pour  $N_c > 10$ .

Les valeurs de l'angle d'inclinaison de la flamme obtenues par l'intermédiaire de différentes relations empiriques sont présentées dans le tableau (VI-9).

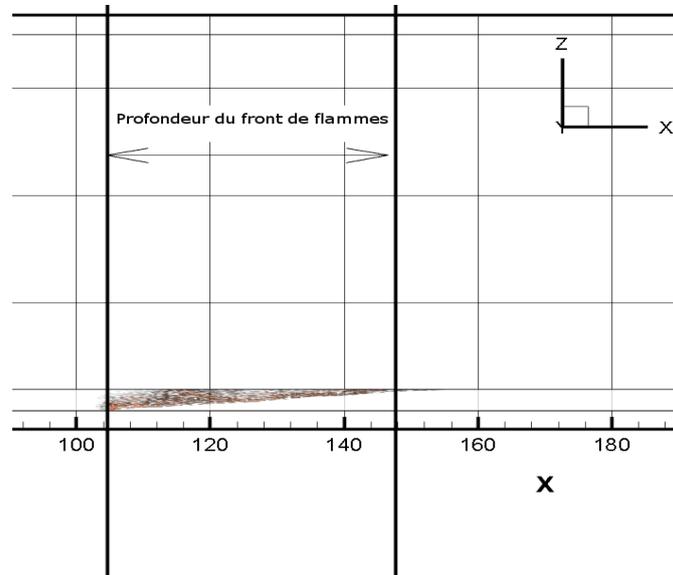
**Tableau VI-9.** Inclinaison de la flamme déterminée avec les modèles empiriques pour une intensité  $I_B$  de 44,62 MW/m

Modèles empiriques	Inclinaison de la flamme $\gamma$ (°)
Albini 1981 [325]	58,31
Nelson et Adkins 1986 [321]	78,23
Weise et Biging 1996	61,18
Morvan 2007	69,75
Nelson 2012	66,83
	33,22

#### VI.2.3.2.3 Épaisseur du front de flammes et temps de résidence

Avec FireStar3D, la profondeur du front de flammes  $d_f$  (figure VI-7) est obtenue géométriquement à partir de la température des particules solides, en tenant compte d'un critère de température du combustible ( $T_s > 600$  K). Cette température seuil de 600 K a été choisie de

manière à ce qu'elle soit supérieure de 100 K à la température de début de combustion, qui est de 500K dans FireStar3D. Ainsi, il est presque certain que la zone de végétation délimitée par ce critère libère de l'énergie, soit en brûlant, soit en se refroidissant après avoir brûlé.



**Figure VI-7.** Profondeur du front du feu dans la direction du vent évalué avec FireStar3D à partir de la température des particules de la végétation ( $T_s > 600K$ )

Le temps de résidence  $\tau$  qui représente la durée totale pendant laquelle le front de flammes occupe un point à la surface du combustible, peut être calculé comme le rapport entre la profondeur horizontale active de la flamme et la vitesse de propagation du feu [52] (Eq. VI.8) :

$$\tau = \frac{d_f}{ROS} \quad (\text{VI.8})$$

Ainsi, FireStar2D et le modèle physique simplifié de Balbi utilisent la même formule pour calculer la profondeur du front de flammes, en multipliant la vitesse de propagation et le temps de résidence (Eq.VI.9) :

$$d_f = ROS \times \tau \quad (\text{VI.9})$$

En revanche, FireStar2D définit le temps de résidence de la flamme comme le gradient de temps pour lequel la température d'un point situé à mi-hauteur du combustible est supérieure à 700 K.

Le modèle physique simplifié de Balbi utilise la formule d'Anderson pour calculer le temps de résidence [250] en considérant uniquement le rapport surface / volume  $s$  du combustible mort (Eq. VI.10) :

$$\tau = \frac{75591}{s} \quad (\text{VI.10})$$

Avec  $40 < s < 4000 \text{ m}^{-1}$ .

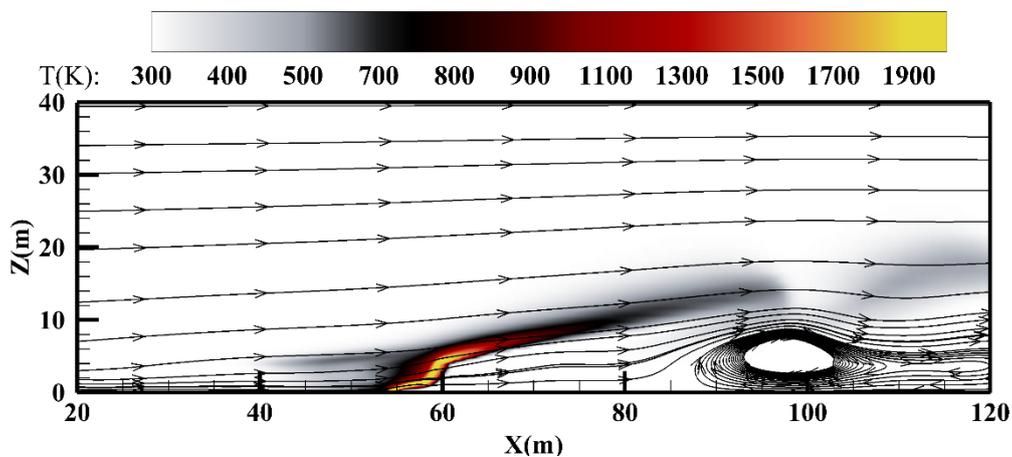
Les résultats concernant la profondeur et le temps de résidence de la flamme sont donnés dans le tableau (VI-10) :

**Tableau VI-10.** Profondeur et temps de résidence de la flamme évalués avec les différents modèles physiques

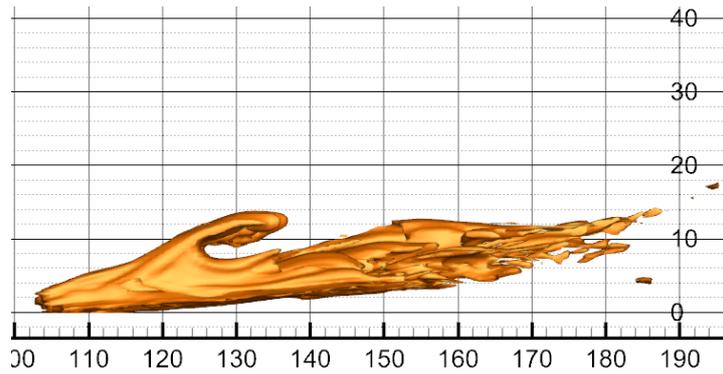
	Profondeur du front (m)	Temps de résidence de la flamme (s)
FIRESTAR2D	20,08	11,35
FIRESTAR3D	44	23,1
Modèle de Balbi	22,54	13,63

#### VI.2.3.2.4 Visualisation du front de flammes

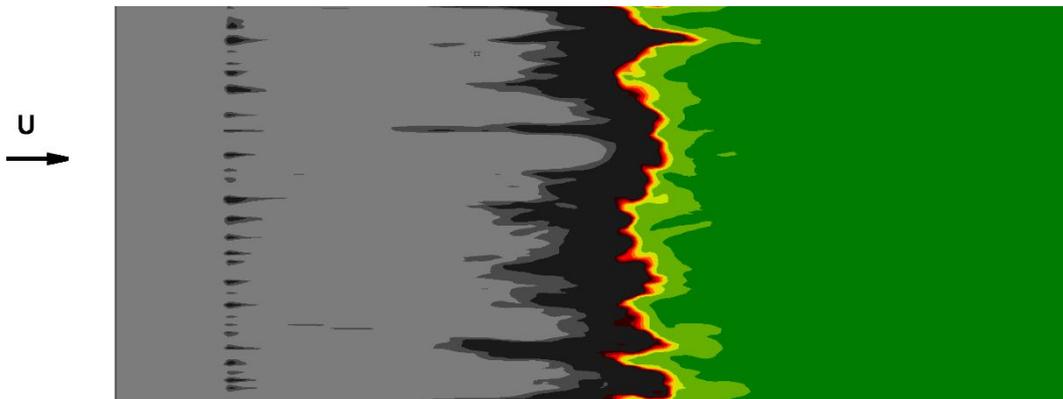
Le code FireStar2D ou FireStar3D permet la représentation du front de flammes durant sa propagation. Par exemple, il est possible de visualiser le champ de températures et les lignes de courant à un instant donné (figure VI-8) ou du front de flammes en 3D (figure VI-9) ou encore le périmètre du front de flammes suivant plusieurs vues (figure VI-10) et (figure VI-11).



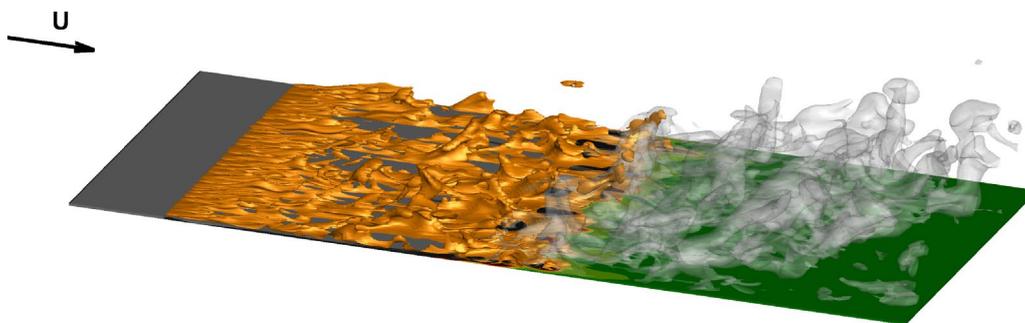
**Figure VI-8.** Champ de températures et des vitesses obtenu avec FireStar2D



**Figure VI-9.** *Vue latérale du front de flammes (isotherme 1000K) obtenu avec FireStar3D*



**Figure VI-10.** *Vue du dessus du front de flammes sur la surface du couvert végétal obtenu avec FireStar3D*



**Figure VI-11.** *Vue 3D du front de flammes obtenu avec FireStar3D*

### **VI.2.3.3 Étude de sensibilité simple**

Pour évaluer la sensibilité des prédictions du modèle aux variations des données utilisées comme entrées, une méthode de sensibilité simple, couramment utilisée par la communauté scientifique, a été employée [117,328]. Six paramètres ont été retenus pour cette étude de sensibilité : l'intensité du vent, la pente du terrain, l'humidité relative, la teneur en eau,

la hauteur du combustible et la charge surfacique du combustible. Le ROS est choisi comme valeur de référence pour tester l'influence d'une variation des paramètres sur la dynamique de feu. La variation du ROS après un changement de  $\pm 20\%$  est estimée en conservant les mêmes valeurs pour les autres paramètres tableau (VI-11).

Il convient de noter que le modèle de Balbi ne tient pas compte de l'humidité relative de l'air. Une variation de l'humidité relative entraîne une variation de la teneur en eau de la végétation, et c'est ce paramètre du combustible qui est pris en compte directement. Dans les modèles FireStar 2D et 3D, une variation de l'humidité relative affecte également la température ambiante, qui est une donnée d'entrée de FireStar.

En ce qui concerne la charge surfacique, le modèle de Balbi inclut la charge végétale morte et la charge totale comme données d'entrée. La variation de  $\pm 20\%$  est appliquée à la partie morte de la plante ainsi qu'à la partie vivante, ce qui permet d'obtenir ce taux de variation sur la charge totale. La charge surfacique dans les modèles FireStar est modifiée grâce la fraction volumique, qui est une donnée d'entrée du modèle.

**Tableau VI-11.** *Variation du ROS après une augmentation ou une diminution de 20% de certains paramètres d'entrées des modèles physiques*

<b>Vent</b>		
<b>Variations</b>	<b>+20%</b>	<b>-20%</b>
Balbi	19,33%	-19,55%
FIRESTAR3D	14,2%	-9,5%
FIRESTAR2D	12,4%	-9,6%
<b>Pente</b>		
<b>Variations</b>	<b>+20%</b>	<b>-20%</b>
FIRESTAR3D	10,5%	-3,7%
FIRESTAR2D	9%	-8,4%
Balbi	0,95%	-0,93%
<b>RH</b>		
<b>Variations</b>	<b>+20%</b>	<b>-20%</b>
FIRESTAR3D	-0,49%	1,11%
FIRESTAR2D	-3,33%	2,25%
Balbi	-	-
<b>FMC</b>		
<b>Variations</b>	<b>+20%</b>	<b>-20%</b>
FIRESTAR3D	-10,5%	21%
FIRESTAR2D	-2,25%	7,34%
Balbi	-5,85%	6,60%

<b>Hauteur du combustible</b>		
<b>Variations</b>	<b>+20%</b>	<b>-20%</b>
Balbi	8,40%	-9,31%
FIRESTAR3D	6,27%	-6,22%
FIRESTAR2D	6,1%	-8,6%
<b>Charge surfacique</b>		
<b>Variations</b>	<b>+20%</b>	<b>-20%</b>
FIRESTAR3D	-15,7%	15,2%
FIRESTAR2D	-8,73%	11,2%
Balbi	-2,08%	3,29%

#### ***VI.2.3.4 Effet du vent et de la pente sur une plage de valeurs plus importante***

Des simulations numériques supplémentaires ont été effectuées à l'aide des différents modèles physiques et empiriques pour étudier l'effet du vent et de la pente sur la vitesse de propagation du front de flammes. La figure (VI-12) représente l'évolution du ROS, pour des valeurs de vent entre 0 à 60 km/h pris à 10 m du sol, évalué à l'aide des différentes approches théoriques choisies. La figure (VI-13) montre également le ROS, calculé avec le modèle physique simplifié, FireStar2D et FireStar3D, en fonction de la pente pour des valeurs comprises entre 0 et 30°. Le vent est fixé à 60 km/h à 10 m au-dessus du sol. Ces études numériques donnent une idée de l'évolution du ROS en fonction de la pente et de la vitesse du vent, en utilisant différentes approches physiques et empiriques sur une gamme plus étendue de valeurs. Pour les modèles empiriques et physique simplifié de Balbi, la vitesse de propagation augmente linéairement avec la vitesse du vent. En revanche, les modèles physiques complets présentent une autre tendance. En effet, prenons l'exemple de FireStar2D (figure VI-12), la vitesse de propagation augmente d'une manière significative entre 0 et 20 km/h, suivant une tendance quasi-linéaire sous forme :  $ROS = a \times U_{10} + b$ , où  $a = 0,07$  et  $b = 0$ . Au-delà de 20 km/h, l'influence du vent sur le ROS s'atténue en suivant la même tendance avec  $a = 0,01$  et  $b = 1,2$ .

En ce qui concerne l'effet de la pente sur la vitesse de propagation du feu, les résultats fournis par les modèles physiques complets et simplifié possèdent les mêmes tendances. Étant donné que la vitesse du vent a été fixée à 60 km/h, l'effet de la pente sera combiné dans ce cas

à l'effet du vent présent. Comme le vent ambiant est assez fort, et que dans le cas initial (pente de  $12^\circ$ ), la flamme était penchée avec une vitesse de propagation rapide. Ainsi, la présence d'une pente plus forte n'aura pas d'effet très significatif sur le comportement du feu. Par conséquent, l'effet de la pente combiné à un vent important n'est donc pas comparable à l'effet de la pente sans vent souvent évoqué dans la littérature [41,220,329].

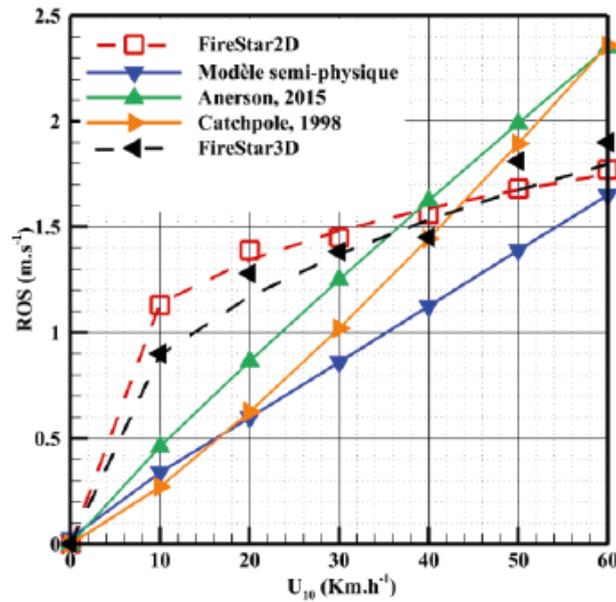


Figure VI-12. Variation du ROS en fonction du vent à 10 m pour différents modèles

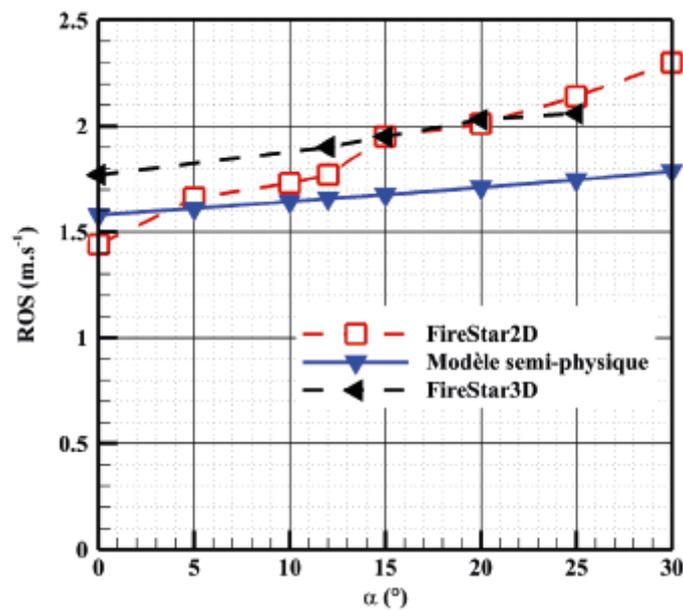


Figure VI-13. Variation du ROS en fonction de la pente du terrain pour les différents modèles physiques

### VI.2.3.5 Effet de la pluviométrie

L'intensité d'un feu est fortement liée à la quantité de combustible effectivement consommée lors de la propagation comme le montre l'équation (IV.5). Cette quantité de combustible consommée est sujette à de nombreuses variations à l'échelle du terrain. En effet, cette grandeur dépend de la disposition du combustible, de la taille de ses éléments et est aussi fortement liée à la teneur en eau de chaque élément de la végétation. Par exemple, juste après une averse, la teneur en eau est plus élevée et donc seule une proportion de la charge surfacique maximale sera consommée. L'intensité de feu sera donc plus faible [52]. Cette modification de l'intensité suite à un ou plusieurs événements pluvieux est très compliquée à évaluer, même si ce problème a déjà fait l'objet d'études expérimentales. Par exemple, McArthur et Cheney [330] ont proposé une règle pour déterminer la proportion de combustible consommable après des événements pluvieux, par rapport à ce qui brûlerait en l'absence de pluie (tableau VI-12).

**Tableau VI-12.** *Changement dans la quantité de combustible jouant un rôle lors de la propagation du feu évaluée pour du Pin de Monterey (pinus radiata) et influence sur l'intensité de Byram [330].*

	Combustible consommé	$I_B$ (kW/m)
Non-brûlé	0	0
<b>Brûlé avec un épisode pluvieux (%)</b>		
1 jour après un épisode pluvieux	16,3	232
2 jours après un épisode pluvieux	15,2	291
14 jours après un épisode pluvieux	55,0	1868
30 jours après un épisode pluvieux	80,6	3874

Même si dans le cas présent le combustible est différent, et si cela nécessiterait une étude plus détaillée pour affiner les résultats, le travail de McArthur et Cheney est utilisé pour avoir une première tendance de l'influence d'épisodes pluvieux, un mois avant la propagation d'un incendie. Les résultats obtenus avec le modèle physique-simplifié sont donnés dans le tableau (VI-13). Jusqu'à 2 jours après l'événement pluvieux, le feu qui se déclenche sera d'une intensité beaucoup plus faible que celle du cas initial (avant la pluie). A partir de 14 jours, le feu présente une intensité assez élevée qui peut dépasser les moyens de lutte. Enfin, les résultats montrent

qu'après environ 30 jours, la pluie n'aura plus d'effet sur le comportement du feu, qui pourra avoir une intensité légèrement inférieure à celle obtenue avant l'épisode pluvieux.

**Tableau VI-13.** *Évaluation de l'intensité de Byram à la suite d'épisodes pluvieux en utilisant les résultats du (tableau VI-12)*

	<b><math>I_B</math> (MW/m) Modèle de Balbi</b>
Pas de pluie	23,81
1 jour après un épisode pluvieux	4,54
2 jours après un épisode pluvieux	4,18
14 jours après un épisode pluvieux	14,52
30 jours après un épisode pluvieux	19,80

## VI.2.4 Conclusions

Les résultats obtenus montrent que pour les conditions choisies, un feu extrême avec une propagation rapide et une intensité de Byram très élevée aurait lieu, indiquant que cet incendie serait incontrôlable par les moyens de lutte qui seraient déployés. En effet, un feu se propageant à travers des arbustes, des prairies ou des forêts, avec une intensité inférieure à 2 MW/m, est contrôlable avec des moyens terrestres. Entre 4 et 10 MW/m, il devient très ou extrêmement difficile à combattre même avec l'appui de moyens aériens, en particulier lorsque la longueur de la flamme est comprise entre 3,5 et 10 m [119,122]. Dans ce cas, toute tentative terrestre de contenir la tête du feu peut échouer. De plus, pour une intensité de feu supérieure à 10 MW/m, comme dans cette étude, un comportement de feu extrême et incontrôlable se produit où l'attaque directe du front de flammes, devient inefficace. Les actions au sol ou aériennes ne peuvent être menées que lorsque les conditions atmosphériques sont moins sévères, par exemple lorsque la température de l'air est plus basse, l'humidité relative de l'air est plus élevée et la vitesse du vent est plus faible. Il est évident que l'ordre de grandeur de ces résultats est relativement élevé et n'est pas fréquemment observé par les opérationnels sur le terrain. Les valeurs trouvées se justifient par le fait qu'un vent fort constant (60 km/h) est supposé se diriger dans la direction de la pente (12°) avec une température ambiante élevée (35°) et une faible humidité relative de l'air (20 %). Il est rare que des conditions aussi extrêmes se produisent,

mais ces considérations ont été prises en compte en concertation avec les opérationnels pour augmenter la marge de sécurité lors de l'utilisation de ces résultats par ces derniers.

Les différentes conventions théoriques, physiques et empiriques, ont toutes montré la même tendance pour le ROS et l'intensité de Byram. Les modèles employés ont aussi été utilisés pour évaluer d'autres caractéristiques du feu liés à la géométrie du front de flammes. L'effet de plusieurs paramètres tels que la pente, le vent et la pluviométrie sur la dynamique du feu, a également été étudié. Cette étude vise également à mettre en avant le fait que les modèles employés peuvent amener à des valeurs différentes car ils n'utilisent pas les mêmes définitions pour chaque grandeur. Cela demande donc une connaissance fine des modèles en phase opérationnelle pour ne pas en tirer des conclusions erronées. Il est donc important que lors de l'utilisation des modèles par les opérationnels sur le terrain, les conventions utilisées soient connues pour mieux interpréter les situations. Les études de sensibilité montrent que le vent a une forte influence sur la dynamique des feux de forte puissance. De même, les variations de la FMC impactent plus la dynamique de ces feux que celles de l'humidité relative de l'air. La charge surfacique et la hauteur du combustible sont aussi des paramètres dont les variations impactent sensiblement la dynamique du front de flammes.

Cette première partie permet donc d'évaluer les valeurs des principales caractéristiques d'un front de flammes dans une configuration considérée comme "critique". Les paramètres qui jouent un rôle plus important que d'autres, comme le vent, ont également été mis en évidence. Cette étude montre clairement que dans de telles conditions, les moyens de lutte contre l'incendie ne peuvent pas arrêter la propagation des flammes. Les résultats obtenus par les différentes approches permettent ainsi de caractériser la dynamique du front de flammes et seront utilisés dans la partie suivante pour quantifier l'énergie qui impacterait les cibles dans de telles conditions.

## VI.3 Étude de l'impact du feu

Une distance de sécurité (SSD<sup>6</sup>) doit être prise en compte lors des activités de lutte contre les incendies (suppression des feux ou évacuation des personnes) [115,298]. La distance de sécurité est d'une importance cruciale pour les personnes et les biens situés dans les interfaces forêt-habitat (WUI). Le concept de WUI a été introduit pour la première fois par Butler [331], qui l'a défini comme toute zone où le combustible consommé par l'incendie passe d'un combustible naturel sauvage (végétation) à un combustible urbain (habitations). Dans ces zones, la corrélation entre les activités humaines et les incendies est forte, ce qui signifie qu'il y a plus de risques que les incendies se déclenchent et se propagent [332]. Le risque est le plus élevé dans les WUI, non seulement en raison du risque important de mise à feu, mais aussi en raison de la concentration de la population, de la diversité des écosystèmes et de la présence d'infrastructures et de bâtiments vulnérables. Une augmentation significative des WUI est observée dans de nombreuses régions du monde, notamment aux États-Unis, au Canada [333,334], en Argentine [335], en Australie [336] et en Afrique du Sud [337]. Par exemple, les WUI aux États-Unis ont connu une croissance exponentielle entre 1990 et 2010, avec une augmentation de 41 % du nombre de résidences et de 31 % de leur superficie [338]. Selon les dernières données disponibles, plus de 46 millions de maisons dans 70 000 agglomérations, d'une valeur estimée à 1,3 billion de dollars, sont aujourd'hui menacées par les feux de forêt aux États-Unis [339]. Au cours des dernières décennies, les WUI du sud de l'Europe connaissent un tel essor, en particulier dans les régions méditerranéennes, où 90 % des incendies de forêt ont été provoqués par des activités humaines [340–342].

La sensibilisation du public aux problèmes liés aux feux de forêt a suscité un regain d'intérêt de la part de la communauté scientifique. Dans ce contexte, des efforts intensifs sont déployés pour prévenir le risque d'incendie. A titre d'exemple, les études menées pour

---

<sup>6</sup> SSD : Safe Separation Distance

caractériser et cartographier les interfaces forêt-habitat afin d'identifier et de localiser les zones cruciales où le risque d'incendie est particulièrement élevé [343,344]. Parmi ces études (réalisées dans la région méditerranéenne française, Sud-Est de la France) [343], les tendances spatio-temporelles des incendies, y compris leurs causes, ont été traitées à une échelle fine (communautés), en comparant différentes périodes entre 1993 et 2017. Ces tendances ont été comparées à celles de l'utilisation des terres et des interfaces forêt-habitat (WUI), où les communautés les plus touchées par les incendies sont proches des grandes villes. Ainsi, une meilleure compréhension de l'évolution spatio-temporelle des incendies et de leurs causes devrait permettre d'affiner les politiques de lutte contre les incendies en termes de sensibilisation, de moyens de lutte et d'aménagement du territoire.

En phase de lutte, les pompiers doivent maintenir une distance de sécurité par rapport au front de flammes afin de les préserver de toute blessure [116,345]. Cette distance de sécurité est également utile pour la mise en œuvre de coupures de combustible destinées à réduire la propagation d'un feu de forêt et ainsi permettre des opérations de suppression. Enfin, les SSD peuvent aussi être très utiles lors de l'aménagement du territoire avec une prise en compte du risque incendie, comme lors de la planification des moyens d'évacuation, ou la construction d'infrastructures (maisons, routes, etc.). Comme il est admis que la cible ne peut pas être touchée par les flammes, définir une SSD revient à déterminer la distance minimale entre un incendie et des personnes ou des structures, afin d'éviter toute blessure ou tout dommage [117]. Dans les interfaces, ces SSD font partie des obligations légales de débroussaillage qui varient en fonction de leur localisation. Autour des habitations, les SSD sont estimés de 50 à 100m dans les interfaces forêts-habitats. Dans les voies des communications, où le massif végétal classé à sensibilité forte à très forte, la largeur de la bande débroussaillée est fixée à 10 à 20 m de part et d'autre de la voie. Pour les lignes électriques, notamment les hautes tensions, une bande débroussaillée de 10 m de part et d'autre du dernier fil est considérée [346].

Généralement, les modèles opérationnels [117,168,169,294,347], évaluent les SSD pour un seuil de vulnérabilité de  $7 \text{ kW/m}^2$  qui correspond à la valeur maximale du flux de chaleur qu'un pompier équipé peut supporter sans souffrir de brûlures. Plusieurs modèles ont été élaborés pour aider les pompiers à estimer la distance de sécurité entre eux et les flammes. Les premières recommandations ont été établies en ne prenant en compte que le mode de transfert de chaleur par rayonnement lors des feux de brousse de forte intensité [348]. Un autre modèle empirique très utilisé par les opérationnels évalue une SSD à partir de la géométrie de la flamme et préconise que la distance de sécurité pour les pompiers devrait être d'au moins quatre fois la hauteur de la flamme [168,347]. D'autres modèles physiques qui ne prennent en compte que le rayonnement, utilisant des approches similaires mais avec des hypothèses différentes concernant la largeur et la température du front de flammes, ont été développés pour estimer la SSD [294].

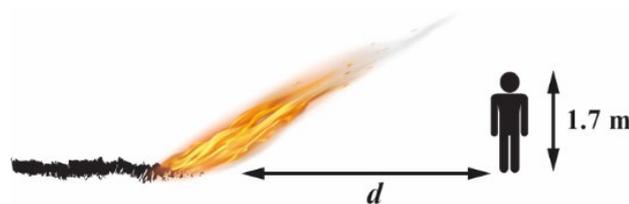
Malgré leur large utilisation, ces modèles possèdent certaines limitations. Des modèles utilisent des relations empiriques entre l'intensité du front de flammes [52,291], et la géométrie de la flamme estimée à partir d'approches statistiques [46,309,315,320,323]. Par conséquent, l'utilisation de ces relations nécessite la connaissance de leurs limites. En particulier, il est nécessaire d'être très vigilant lors de leur utilisation pour les types de combustibles qui sont structurellement très différents. En outre, tous ces modèles sont uniquement basés sur le rayonnement thermique sans tenir compte de la convection qui peut avoir une contribution non négligeable, notamment, en présence d'un vent fort et d'une pente importante. Butler *et al.* [349] ont argumenté sur la nécessité d'utiliser des mesures sur le terrain de la quantité de chaleur rayonnée et convective, dans le but d'améliorer les directives existantes sur les zones de sécurité. De plus, les formulations physiques complètes sont également pertinentes pour évaluer les SSD, car ces approches donnent des informations sur la dynamique d'un feu mais sont aussi susceptibles de quantifier les flux de chaleur radiatifs et convectifs qui impactent des cibles

[59,212]. L'objectif de cette étude est de calculer les SSD pour différents types de cibles (humains et bâtiments), dans le cas d'un feu de forte puissance décrit dans la section précédente de ce chapitre. L'évaluation des SSD est ainsi réalisée en prenant en compte les flux thermiques totaux maximaux reçus à différentes positions, en utilisant le modèle physique complet Firestar2D [295].

### VI.3.1 Description des cibles

Afin d'étudier l'impact d'un feu de forte intensité, deux cibles différentes ont été sélectionnées et sont décrites dans cette section ; il s'agit d'un être humain adulte et d'un bâtiment.

- Être humain adulte : Une personne d'une taille moyenne de 1,70 m est considérée comme la cible pour le calcul des différents flux de chaleur (radiatif et convectif). La personne est supposée se tenir perpendiculairement au sol à une distance  $d$  de la flamme (figure VI-14).
- Bâtiment : On considère une construction à trois niveaux avec une façade de 10 m de large. R0 est le niveau à 0 m, R1 est le niveau à 3 m, R2 à 6 m et le toit R3 à 9 m (figure VI-15). Les flux de chaleur radiatifs et convectifs sont évalués à ces niveaux, et les valeurs des SSD sont ensuite déterminées en fonction du flux de chaleur maximal acceptable lié au type de matériau utilisé pour la cible.



**Figure VI-14.** Configuration de la cible " être humain adulte " par rapport à la position du front de flammes



**Figure VI-15.** Configuration de la cible "bâtiment" par rapport à la position du front de flammes

### VI.3.2 Approche numérique

Les simulations numériques ont été faites à l'aide du code physique complet FireStar2D. Les détails concernant la configuration du cas étudié sur les données d'entrée du code (conditions météo, topographie, végétation), sont présentés dans la première partie de ce chapitre. Le domaine numérique 2D et les différentes conditions aux limites sont détaillés dans la section (IV.1.1).

Concernant la méthode adoptée pour évaluer l'impact du feu sur les cibles, le flux de chaleur radiatif est calculé sur FireStar2D selon les équations (II.61-II.62). Le flux de chaleur convectif est, quant à lui, estimé à l'aide de la loi de Newton (Eq. IV.9). Le coefficient de transfert de chaleur convectif  $h_c$  est calculé en se basant sur des corrélations empiriques pour des écoulements turbulents ou laminaires, en fonction de la cible envisagée. Ainsi, le modèle proposé par Oguro *et al.* [350] a été choisi pour un corps humain en position debout. Ce modèle a été testé jusqu'à une vitesse de vent de 6 m/s. Pour un bâtiment, le modèle MOWITT [351] a été utilisé et validé pour des vitesses de vent allant jusqu'à 12 m/s.

Lorsque la cible est un être humain, la température ambiante  $T_a$  est supposée être égale à 34,2 °C [350] et  $h_{c,H}$  est donné en utilisant la relation suivante (VI.11):

$$h_{c,H} = 9,41 U^{0,61} \quad (\text{VI.11})$$

Avec  $U$  la vitesse du flux de gaz estimée à la position de la cible.

En ce qui concerne le bâtiment, il existe différentes méthodes pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection  $h_{c,ext}$  qui est nécessaire pour quantifier le transfert de chaleur convectif entre l'environnement extérieur (flux turbulent généré par un feu de forêt) et la façade du bâtiment. Les méthodes analytiques ne sont applicables qu'à certains régimes d'écoulement très spécifiques et pour des géométries simples telles que des plaques planes ou des cylindres [352]. Les méthodes numériques sont des outils puissants pour calculer  $h_{c,ext}$  ; mais ces simulations nécessitent d'importantes ressources en temps de calcul [353]. Les méthodes expérimentales, utilisant des tests à échelle réduite ou à échelle réelle, est un moyen d'obtenir une valeur de  $h_{c,ext}$ . Compte tenu de la complexité du problème, les recherches expérimentales ont conduit à une variété de modèles proposant différents modèles empiriques pour estimer ce paramètre. Mirsadeghi *et al.* ont examiné ces modèles dans un article détaillé [354]. Dans notre étude, le modèle MOWITT [351] a été choisi pour évaluer le transfert de chaleur par convection entre le flux généré par les flammes et la façade du bâtiment. Ce modèle est basé sur des expériences à grande échelle et propose l'expression suivante du coefficient de transfert de chaleur convectif :

$$h_{c,ext} = \sqrt{(C_t(T_a - T)^{1/3})^2 + (aV_0^b)^2} \quad (VI.12)$$

Où  $C_t$  est la constante de convection naturelle turbulente,  $T_a$  est la température de surface supposée égale à la température ambiante et  $T$  est la température du mélange gazeux.  $V_0$  représente la vitesse d'écoulement du gaz et  $a$  et  $b$  sont les constantes pour les surfaces exposées au vent et sous le vent. Pour notre étude, les constantes correspondant à la surface exposée au vent sont donc utilisées (tableau VI-14).

Selon l'équation (VI.12), cette relation inclut des composantes de convection naturelle et forcée de telle sorte que l'effet de chaque composante, dans sa région, domine le calcul de  $h_{c,ext}$  [351]. Les résultats fournis par ce modèle montrent un accord satisfaisant avec les mesures expérimentales par rapport à d'autres modèles existants. Il convient de mentionner que ce

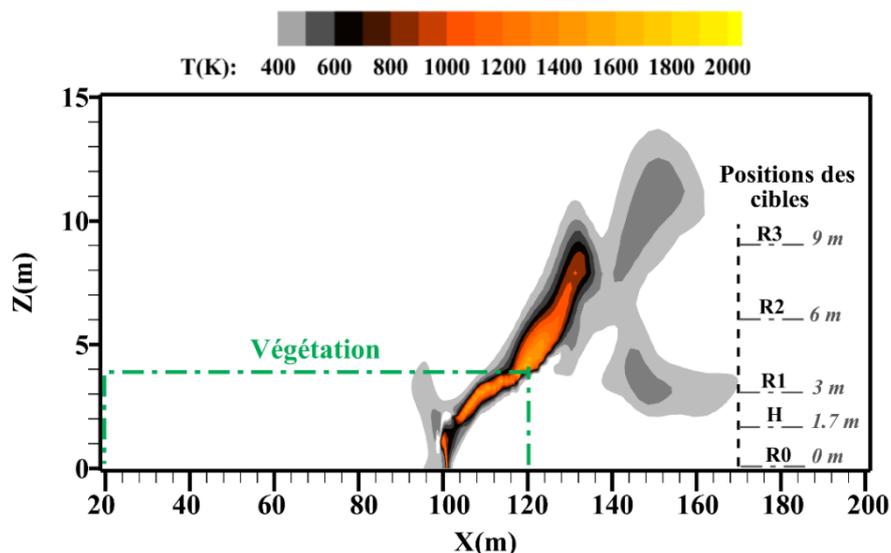
modèle est mis en œuvre dans différents codes de simulation qui représentent des outils importants pour la conception et l'exploitation des bâtiments [355]. En conséquence, cette corrélation nous semble être une représentation adéquate du transfert de chaleur par convection entre la flamme et la surface verticale du bâtiment.

**Tableau VI-14.** Valeurs des constantes de  $h_{c,ext}$  évaluées à l'aide du modèle de MOWITT

Direction du vent	$C_t$ (W/m <sup>2</sup> .K <sup>4/3</sup> )	a (W/m <sup>2</sup> .K.(m/s) <sup>b</sup> )	b	rms (W/m <sup>2</sup> .K)
Surface au vent	0,84 ± 0,015	2,38 ± 0,036	0,89 ± 0,009	0,91

### VI.3.3 Résultats et discussions

Dans cette étude, l'évaluation des SSD est basée sur la quantification des flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus par ces cibles, lorsque le front de flammes atteint la limite supérieure de la parcelle (figure VI-16). La partie entre la cible et le front de flammes est dépourvue de combustible.



**Figure VI-16.** Champs de températures instantanées obtenus à l'aide de FireStar2D lorsque le front flammes atteint la fin de la végétation sur la parcelle

Une fois que le transfert de chaleur entre le front de feu et la cible est obtenu en fonction de la distance qui les sépare, les SSD peuvent être estimées à l'aide de valeurs seuils de vulnérabilité liées au type de cible considérées. Par exemple, la valeur maximale du flux thermique tolérable pour des personnes non protégées est de 5 kW/m<sup>2</sup> [117]. Pour un pompier

portant des vêtements résistants au rayonnement thermique et couvrant la quasi-totalité de la surface du corps, cette valeur est de  $7 \text{ kW/m}^2$ . Il convient de mentionner que cette valeur seuil du flux thermique peut varier en fonction de la durée de l'exposition. Par exemple, selon l'API 521 (American Petroleum Institute 521) [356], pour un rayonnement thermique d'environ  $5 \text{ kW/m}^2$ , le temps nécessaire pour atteindre le seuil de douleur est de l'ordre de 16 s [357]. Par conséquent, l'API 521 suggère, pour des personnels ne disposant pas de protection mais portant des vêtements appropriés, un seuil de  $6,3 \text{ kW/m}^2$  lors d'interventions d'urgence d'une durée maximale d'une minute. Pour une exposition continue, un seuil de très bas de  $1,58 \text{ kW/m}^2$  est suggéré.

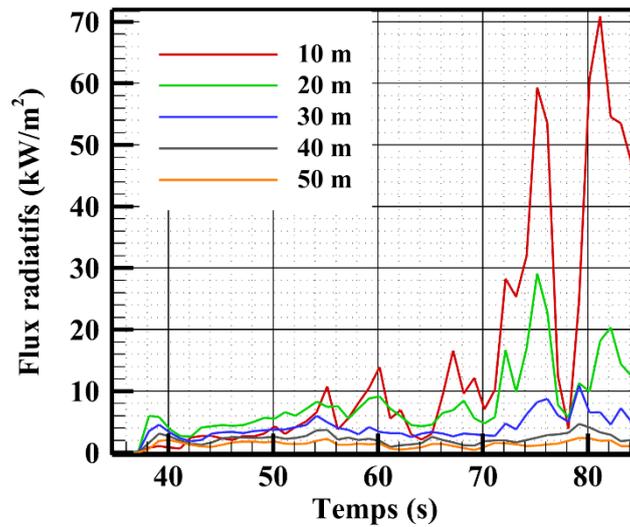
Le tableau (VI-15) présente des exemples des seuils de flux de chaleur pour les personnes non protégées, les pompiers et certains matériaux de construction présents dans les bâtiments, tels que l'acier, le bois et les matériaux plastiques (polystyrène, polyuréthane expansé, PVC, etc.).

**Tableau VI-15.** Valeurs seuils de flux thermique pour différents types de cibles [115,358–360]

Flux de chaleur seuil ( $\text{kW/m}^2$ )	Critères
5	Valeur maximale tolérable pour les personnes non protégées
7	Valeur maximale tolérable pour un pompier complètement protégé
10	Allumage de certains polymères
12	Allumage du bois non piloté
25	L'acier mince peut perdre son intégrité mécanique
37,5	Mort instantanée, dommages aux équipements de traitement et effondrement des structures mécaniques

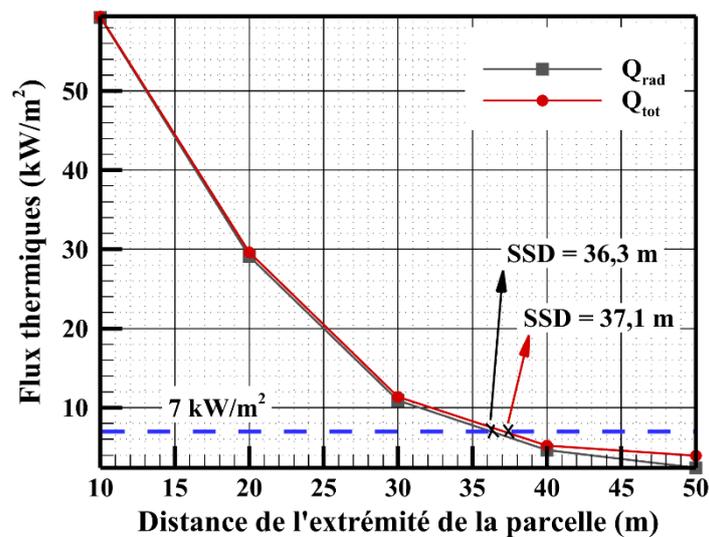
### VI.3.3.1 Être humain

La figure (VI-17) représente l'évolution temporelle des flux de chaleur radiatifs, calculés avec FireStar2D, pour une personne située à des distances de 10, 20, 30, 40 et 50 m de l'extrémité de la parcelle. Cette figure permet d'évaluer les valeurs des flux radiatifs maximaux reçus par la cible à chaque distance loin du front de flammes.



**Figure VI-17.** Évolution des flux de chaleur radiatifs, calculés avec FireStar2D, pour une personne située à des distances de 10, 20, 30, 40 et 50 m de l'extrémité de la parcelle

La figure (VI-18) montre que la représentation du flux thermique radiatif maximal ( $Q_{rad}$ ) reçu par la cible en fonction de la distance  $d$  du front de flammes, a l'allure d'une courbe exponentielle décroissante. Par exemple, si la cible considérée est un pompier équipé qui peut supporter un flux inférieur à  $7 \text{ kW/m}^2$  sans blessure (tableau VI-15), la SSD pour cette valeur seuil, en ne considérant que le flux de chaleur radiatif, peut être déterminée graphiquement, et donne une valeur de  $SSD = 36,3 \text{ m}$ .



**Figure VI-18.** Flux de chaleur radiatifs et totaux maximaux reçus par le corps humain à différentes positions lorsque le feu atteint la fin de la parcelle de végétation

En introduisant la contribution du transfert de chaleur par convection, le flux de chaleur total ( $Q_{tot}$ ), qui est la somme des flux de chaleur radiatifs et convectifs, suit également la même tendance et peut être décrit par une fonction exponentielle décroissante en fonction de la distance entre le front de flammes et le corps humain (figure VI-18). La valeur de la SSD évaluée graphiquement est égale à 37,1 m. Par conséquent, la prise en compte de la convection augmente la SSD de moins de 2 %. Il est à noter que ces résultats sont en accord avec ceux trouvés lors de feux expérimentaux à l'échelle du terrain. En effet, les feux expérimentaux de forte intensité menés à Letia et à Speluncatu (décrits dans les chapitres précédents), ont mis en évidence le même ordre de grandeur entre les flux de chaleur convectifs et radiatifs reçus par des fluxmètres (hauteur < 3 m) situés à plus de 6 m de l'extrémité de la parcelle [59,212]. Il est également important de rappeler que la contribution de la convection dépend aussi de la position relative entre la flamme et la cible, et donc de l'angle d'inclinaison de la flamme, qui déterminera l'orientation des gaz chauds. La (figure VI-16) montre que pour une personne d'une hauteur de 1,7 m, il n'y a pas de contact significatif entre la flamme et la cible. Par conséquent, de faibles flux convectifs ont été obtenus avec une prépondérance du transfert de chaleur radiatif. Ce résultat confirme également que les modèles théoriques de SSD, même lorsqu'ils sont basés uniquement sur le transfert de chaleur radiatif, peuvent être utilisés pour aider les opérationnels à prendre des décisions pour des feux de forêt de forte intensité. Selon certains modèles existants, pour des hauteurs de flammes inférieures à 10 m et des pentes inférieures à 25 %, la distance de sécurité requise varie de 20 à 50 m, afin de limiter la probabilité de blessure mortelle à 1 ou 5 % en l'absence d'abri anti-incendie [298]. Cependant, lorsque la hauteur de la flamme dépasse 10 m, les modèles prévoient des SSD qui varient d'une à quatre fois la hauteur de la flamme [117,294,298]. Dans le cas étudié, la pente du terrain est modérée (21%), et la hauteur moyenne de flamme  $h_f$  évaluée entre le sommet de la flamme visuelle (à une isotherme de gaz chaud de 1000 K) et la surface du sol a été prédite numériquement égale à  $h_f \approx 7,3$  m (évaluée

dans la première partie de ce chapitre). Par conséquent, en comparant les résultats obtenus sur FireStar2D et les modèles empiriques habituellement utilisés, une SSD de 50 m semble être suffisante pour prévenir les blessures mortelles. Cependant, une étude récente indique que la hauteur des flammes d'un feu de cime est approximativement le double de la hauteur de la végétation [361]. Pour prendre en compte l'effet de la convection, le modèle proposé par cette étude stipule que la SSD est égale à 4 fois la hauteur de la flamme, multipliée par un facteur qui prend en compte le vent et la pente. En conséquence, la valeur de la SSD se trouve trois à quatre fois plus élevée que celle obtenue numériquement dans cette étude. Il convient de mentionner que le cas étudié à Sari-Solenzara correspond à une propagation d'un feu de surface. Cela signifie que des travaux plus approfondis devront être menés dans le futur, afin de prendre en compte des végétations de type forêt et pinède (feux de cimes).

### VI.3.3.2 Bâtiment

L'impact du feu sur un bâtiment a été aussi étudié en évaluant les flux de chaleur radiatifs (figure VI-19), convectifs (figure VI-20) et totaux (figure VI-21), reçus par un bâtiment disposant de quatre niveaux (0, 3, 6 et 9 m).

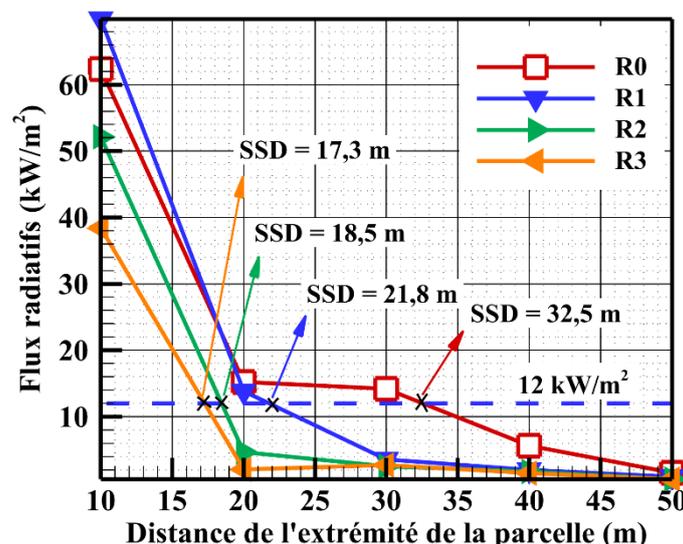


Figure VI-19. Flux de chaleur radiatifs reçus par chaque niveau du bâtiment en fonction de la distance séparant l'édifice du front de flammes

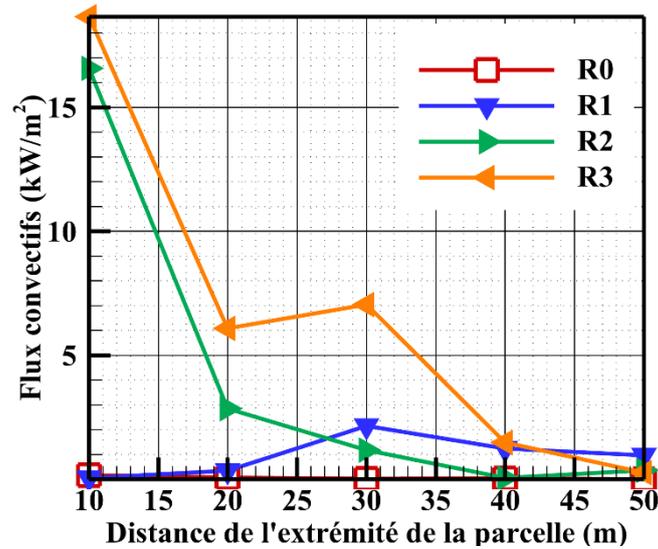


Figure VI-20. Flux de chaleur convectifs reçus par chaque niveau du bâtiment en fonction de la distance séparant l'édifice du front de flammes

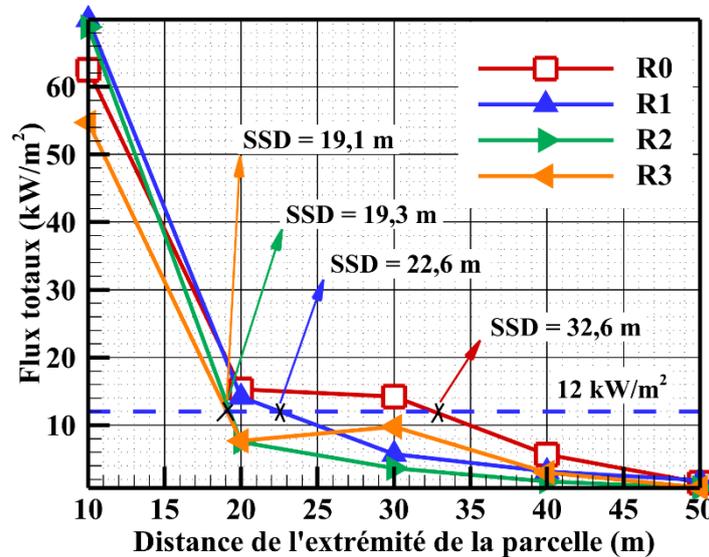


Figure VI-21. Flux de chaleur totaux reçus par chaque niveau du bâtiment en fonction de la distance séparant l'édifice du front de flammes

Pour cette étude, nous avons considéré que les ouvertures sur la façade étaient en bois (volets, persiennes, portes) et que les recommandations de fermer les volets lors d'un feu étaient respectées. Partant de cette hypothèse, la valeur maximale tolérable pour l'ignition du bois ( $Q_{tot} = 12 \text{ kW/m}^2$ ) est adoptée pour estimer les distances de sécurité. Les SSD évaluées graphiquement, en ne tenant compte que de la contribution radiative, sont égales à 32,5 m, 21,8 m, 18,5 m et 17,3 m pour les niveaux R0, R1, R2 et R3, respectivement (figure VI-19). Si le transfert de chaleur par convection est pris en compte, ces valeurs passent à 32,6 m, 22,6 m,

19,3 m et 19,1 m, respectivement (figure VI-21). Il est à noter que, quel que soit le type de matériau de construction, l'évaluation graphique de la SSD peut être réalisée sur la base de la connaissance du seuil de flux thermique que la cible peut supporter sans dommage.

Les résultats obtenus révèlent que la contribution du rayonnement est le facteur dominant pour l'évaluation de la SSD pour les différents niveaux du bâtiment. De plus, les résultats de la figure (VI-20) montrent que la contribution de la convection est plus importante pour une distance entre la cible et le front de flammes inférieure à 30 m, et augmente globalement avec la hauteur du bâtiment. Néanmoins, il semble assez compliqué de donner une tendance générale pour la contribution de la convection en fonction de la hauteur où se situe la cible sur la façade. Ceci peut être dû aux mouvements des gaz chauds qui ne suivent pas une direction unique, comme l'illustre la figure (VI-16). Par conséquent, alors que le rayonnement suit globalement une diminution exponentielle lorsque la cible s'éloigne du front de flammes pour les différents niveaux de l'édifice, le transfert de chaleur convectif dépend davantage de la prise en compte de l'élévation de la cible et de son éloignement. Des résultats différents ont été obtenus dans une étude numérique 3D réalisée sur un modèle physique complet (FDS), qui traite 3 cas d'habitations WUI entourés par des jardins, adjacents à une forêt affectée par un feu antérieur [362]. Les résultats ont montré que le débroussaillage atténuait l'intensité et la propagation des incendies ainsi que les dommages causés à la végétation ornementale. Cependant, il a parfois été mis en évidence que cette mesure pouvait être renforcée et que la zone traitée aurait dû être étendue au-delà du débroussaillage obligatoire de 50 m, jusqu'à 100 m, lorsque les effets de la topographie et du vent étaient combinés. De plus, les résultats numériques des flux de chaleur obtenus dans ce cas ont montré que la convection était dominante par rapport au rayonnement, contrairement aux résultats obtenus dans notre cas critique et certaines études précédentes [363,364]. Comme mentionné précédemment, en vue que la contribution de la convection dépend du contact entre les gaz chauds et la cible, cette

différence entre les résultats est due aux conditions de propagation liés à la météorologie, topographie, ainsi que le type de la végétation, qui jouent un rôle primordial sur le comportement et la géométrie d'un front de flammes.

### ***VI.3.3.3 Formules à usage opérationnel***

L'un des objectifs de cette étude est de fournir aux opérationnels des formules simples à utiliser susceptibles de déterminer le flux thermique total à chaque position en avant du front de flammes, et ainsi être en capacité d'évaluer les SSD dans le cas d'un feu de forte intensité. Ces formules sont dérivées des résultats graphiques présentés dans les figures (VI-18 et VI-21), qui lient le flux total  $Q_{tot}$  et la distance séparant la cible du front de flammes  $d$ , comme suivant (VI.13) :

$$Q_{tot} = A \times d^B \quad (VI.13)$$

$A$  et  $B$  sont des constantes liées à chaque type de cible (le corps humain et les différents niveaux du bâtiment), comme indiqué dans le (tableau VI-16). Les valeurs de ces constantes sont évaluées en traçant les courbes de tendances (loi puissance) pour tous les graphiques présents dans les figures (VI-18 et VI-21).

Ainsi, la SSD pour une cible peut être estimée simplement en remplaçant dans l'équation (VI.13),  $Q_{tot}$  par la valeur maximale tolérable du flux thermique.

Par exemple, pour un sapeur-pompier équipé,  $Q_{max} = Q_{tot} = 7 \text{ kW/m}^2$  donne une valeur de  $d = \text{SSD} = 33,6 \text{ m}$ .

Pour un bâtiment, en prenant comme exemple la valeur seuil d'ignition du bois ( $Q_{tot} = 12 \text{ kW/m}^2$ ), les distances de sécurité pour éviter les dommages sont de 25,5 m, 21,6 m, 18,5 m et 13,7 m, pour les niveaux R0, R1, R2 et R3, respectivement.

Il convient de faire remarquer que les valeurs des SSD obtenues graphiquement et analytiquement à l'aide de la formule proposée sont toutes inférieures à 50 m. Cela confirme, pour les conditions choisies dans ce « cas critique », que la valeur fixée par la réglementation à

dire d'expert en Corse, semble être efficace pour prévenir les dommages et les blessures lorsque les projections de brandons ne sont pas prises en compte.

**Tableau VI-16.** Coefficients de la formule à usage opérationnel (corps humain et bâtiment).  $Q_{tot}$  exprimé en  $kW/m^2$  et  $d$  en m.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Corps human H (taille: 1,7 m)	7883,2	-2	0,9474
Bâtiment niveau R0 (0,21 m)	3545	-1,756	0,9829
Bâtiment niveau R1 (3 m)	13 460	-2,285	0,9999
Bâtiment niveau R2 (6 m)	32 423	-2,71	0,9906
Bâtiment niveau R3 (9 m)	487,3	-1,417	0,9316

### VI.3.4 Analyse de sensibilité globale

La capacité prédictive des modèles de comportement des feux de forêt dépend de la précision avec laquelle ces paramètres sont estimés. Malheureusement, la plupart d'entre eux sont difficiles à mesurer et/ou présentent un certain degré de variabilité, ce qui entraîne l'incertitude des résultats. L'objectif de cette section est de répondre à la question suivante : quels sont les paramètres d'entrée des modèles qui ont la plus grande influence sur les résultats obtenus concernant l'impact d'un feu sur des cibles ?

L'analyse de sensibilité globale a été définie par Zhou et Lin [365] comme la quantification des incertitudes de sortie par rapport aux incertitudes d'entrée en faisant varier toutes les entrées simultanément, et en évaluant l'effet de la variation de l'ensemble sur la sortie. Cette méthode permet d'étudier les interactions entre deux données d'entrée et plus. En général, le nombre de simulations nécessaires est de  $2^i$ , où  $i$  est le nombre de paramètres. Étant donné que le nombre de simulations peut être élevé si les données d'entrée sont nombreuses, seules les entrées les plus importantes déterminées lors de l'étude de sensibilité simple faite précédemment (section VI.2.3.3) (tableau VI-11) sont prises en compte, afin de réduire le temps de simulation. Ces paramètres sont présentés dans le tableau (VI-17) et peuvent varier de  $\pm 10\%$ .

**Tableau VI-17.** Paramètres utilisés pour de l'analyse de sensibilité globale

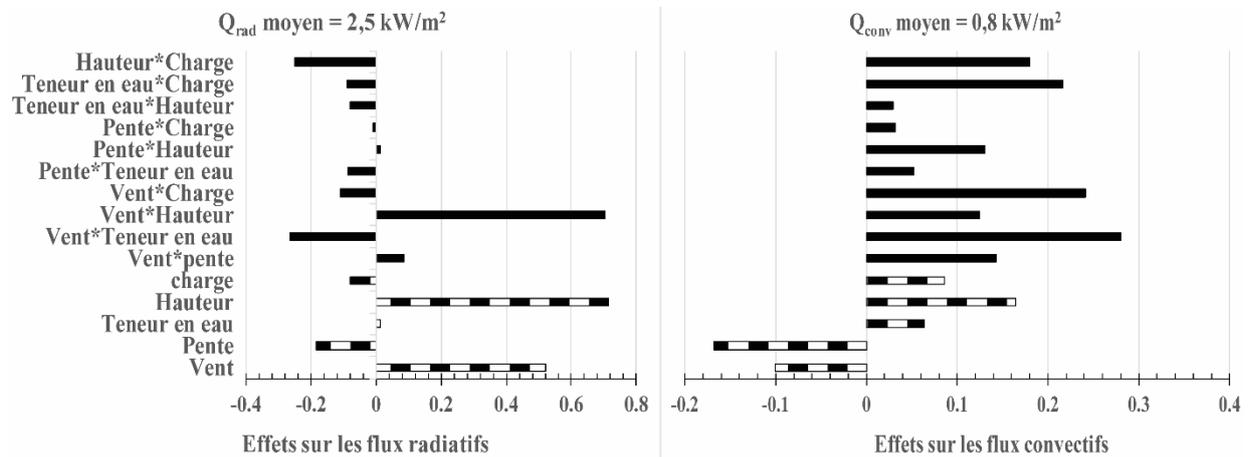
Paramètre	Description	10%	Valeur de référence	+10%
$U_{10}$ (m/s)	Vitesse du vent	14,94	16,6	18,26
$\alpha$ (°)	Pente	10,8	12	13,2
$m$ (°)	Teneur en eau	62,51	69,45	76,39
$e$ (°)	Hauteur du combustible	3,6	4	4,4
$\sigma$ (kg/m <sup>2</sup> )	Charge surfacique	2,41	2,68	2,95

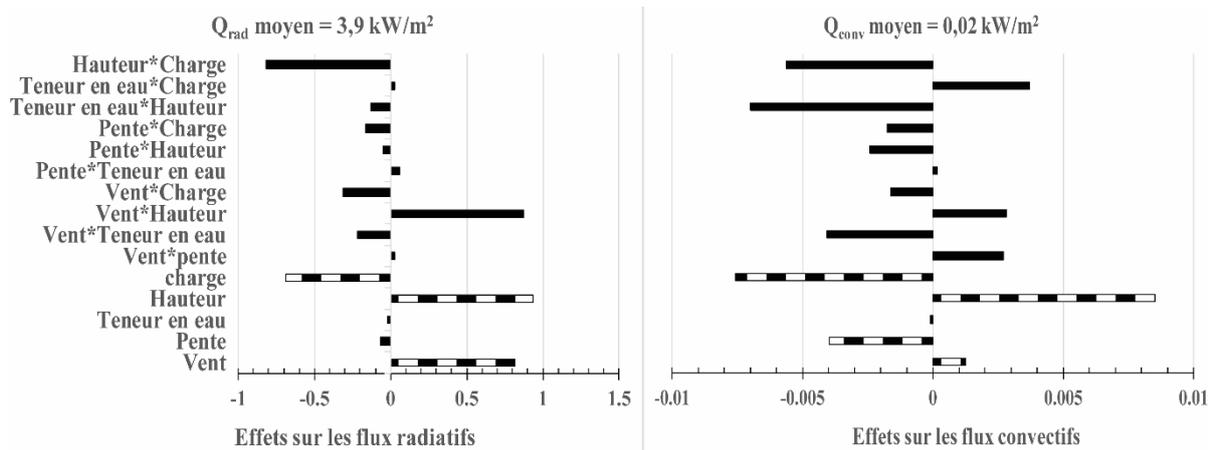
Comme le rapportent Abou *et al.* [366] et Drissi [367], en utilisant la méthode du plan d'expérience [368], l'effet de chaque facteur peut être calculé comme suivant :

$$y_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \times \text{niveau}_{ij} \quad (\text{VI.14})$$

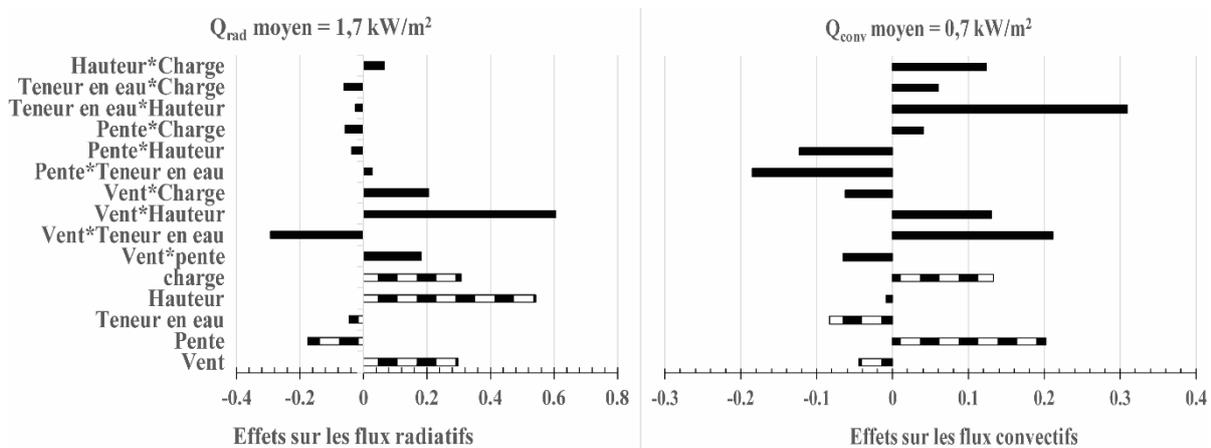
Avec  $n = 2^i$  le nombre total de simulations ( $2^5 = 32$  pour cette étude) et  $X_i$  la réponse (valeur du flux) pour chaque simulation, multipliée par le  $\text{niveau}_{ij}$  qui est égal à +1 ou -1 selon si  $X_i$  est la réponse correspondante à +10 % ou -10 %.

Les effets simples des paramètres présents dans le tableau (VI-17), ainsi que les effets de certains facteurs combinés (second degré) sur les flux radiatifs et convectifs reçus par un être humain, et également un bâtiment disposant de 4 niveaux sont donnés dans les figures (VI-22, VI-23, VI-24, VI-25, VI-26).

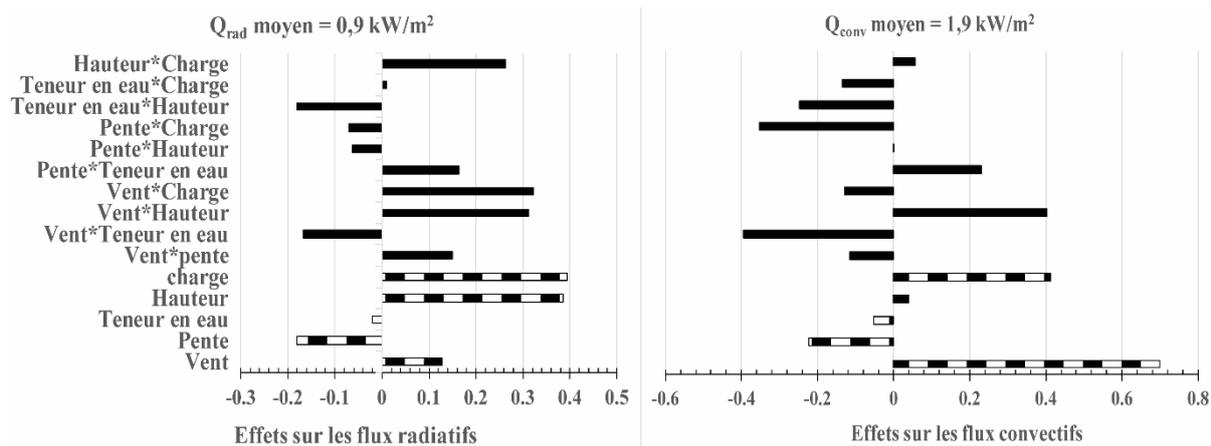




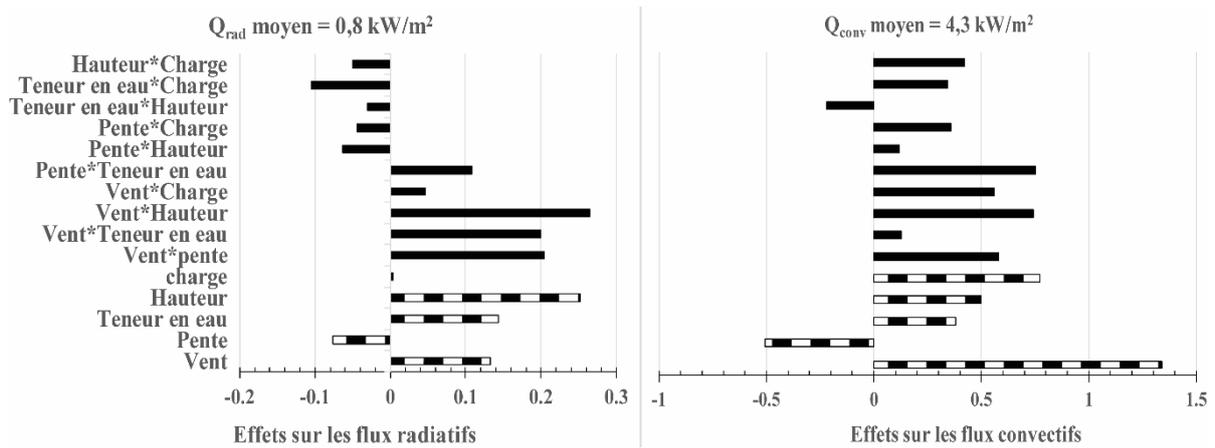
**Figure VI-23.** Effet des facteurs d'entrées sur les flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus à 50 m du front de flammes par le niveau R0 d'un bâtiment



**Figure VI-24.** Effet des facteurs d'entrées sur les flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus à 50 m du front de flammes par le niveau R1 d'un bâtiment



**Figure VI-25.** Effet des facteurs d'entrées sur les flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus à 50 m du front de flammes par le niveau R2 d'un bâtiment



**Figure VI-26.** Effet des facteurs d'entrées sur les flux de chaleur radiatifs et convectifs reçus à 50 m du front de flammes par le niveau R3 d'un bâtiment

Cette étude de sensibilité globale est effectuée sur les flux évalués à l'aide du code FireStar2D lorsque la cible est à 50 m loin du front de flammes. Elle permet de tester si la modification des paramètres d'entrée de  $\pm 10\%$  a un effet sur la valeur des flux de chaleur radiatifs et totaux. Les figures ci-dessus montrent de légères variations des flux autour des valeurs moyennes pour les différents cas testés. Les résultats montrent aussi que l'effet d'un paramètre donné peut être différent d'une configuration à une autre. Cela est lié au fait que les flux radiatifs et convectifs sont évalués à un instant  $t$  donné et que les résultats dépendent fortement de la géométrie de la flamme à cet instant, notamment son inclinaison et son contact avec la cible. En revanche, malgré ces fluctuations, la conclusion essentielle qu'il est possible de retenir est que des incertitudes de  $\pm 10\%$  sur les données d'entrée n'influencent que légèrement l'impact du feu sur la cible lorsque cette dernière est à 50 m des flammes.

### VI.3.5 Conclusions

Cette étude porte sur l'évaluation des distances de sécurité appropriées entre un feu de forêt et différents types de cibles (corps humain et bâtiment) en utilisant le modèle physique complet FireStar2D. Cette expertise scientifique est considérée comme représentative de la plupart des situations à haut risque d'incendie de forêt en Corse par les opérationnels auxquels elle a été présentée lors d'une réunion du GTI le 08 novembre 2021. Après cette présentation,

la Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF) de Corse, a décidé de consacrer la lettre d'information des partenaires de la Défense des forêts contre les incendies pour les élus de la Corse de Novembre 2021 à cette expertise (figure VI-27).

Cette étude décrit, en premier lieu, la méthodologie utilisée à l'aide de FireStar2D pour déterminer les SSD pour un « cas critique » qui génère un feu de forte puissance. Cette méthodologie conduit à des formules à usage opérationnel qui relient le flux thermique total (radiatif et convectif) à la distance séparant les cibles du front de feu. Les SSD sont ensuite évaluées en considérant des valeurs seuils du flux de chaleur thermique, qui peut être reçu par la cible. Les SSD évaluées à l'aide de cette méthodologie, tant pour un sapeur-pompier équipé que pour un bâtiment, sont inférieures à 50 m. Par conséquent, cela confirme l'efficacité de la valeur de zone à débroussailler autour des habitations, fixée en France à 50 m par la réglementation. Cette étude montre que cette réglementation est pertinente pour tous les feux de forêt se propageant sur un territoire couvert par une végétation de type maquis arboré de moins de 4 m, avec une vitesse de vent et une pente de terrain inférieurs à 16 m/s et 12°, respectivement. Il convient de mentionner que la contribution du transfert de chaleur radiatif a été le facteur dominant dans l'évaluation de la SSD ce qui donne du crédit aux formules empiriques généralement utilisées par les opérationnels. Cependant, des tests numériques supplémentaires doivent être effectués sur l'effet de la variation de certains paramètres avec des marges importantes, sur l'impact du feu et sur les valeurs de SSD, notamment la pente du terrain, le vent ambiant et les caractéristiques de la végétation (charge surfacique, teneur en eau). D'autres types de cibles devront être envisagées (différents matériaux : verre, PVC, Aluminium), afin de vérifier qu'une valeur de SSD de 50 m est toujours justifiée dans des configurations et conditions variées.



# Conclusions et perspectives

---

Les feux de forte puissance qui font partie de la famille des feux extrêmes commencent à devenir la nouvelle norme dans le monde entier par l'augmentation des superficies brûlées et de leur fréquence. Compte tenu du risque inhérent à ce type d'incendies du fait des dommages humains, environnementaux et socio-économiques qu'ils provoquent, leur étude s'avère de première importance. Une meilleure compréhension de ces derniers, permettrait de fournir des informations aux opérationnels chargés de les arrêter, de les contenir ou de les anticiper. Dans ce contexte, trois feux expérimentaux ont été réalisés en Corse à l'échelle du terrain, dans trois configurations différentes, à travers une végétation de type maquis. Ces expériences ont ainsi permis d'obtenir des mesures afin de caractériser le comportement du feu avec des conditions de propagation variées. Les conditions de ces feux expérimentaux ont été choisies pour se rapprocher le plus possible de celles des feux réels de forte puissance. De plus, des données détaillées, comme les conditions météorologiques, la topographie ou la végétation, peuvent servir de données d'entrée pour les modèles de propagation des feux de forêt, en particulier, les modèles physiques complets, utilisés dans cette thèse : FireStar2D et 3D. De telles données offrent la possibilité de tester la robustesse des modèles pour la simulation des feux de forte puissance.

## *Première partie de la thèse*

- Feux expérimentaux

La 1<sup>ère</sup> partie de la thèse porte sur la description détaillée du protocole expérimental établi pour réaliser les feux de terrain. Trois parcelles ont été choisies dans deux régions de

Corse, lors de saisons différentes (automne et printemps), en se basant sur des critères qui permettent de déclencher des feux de forte puissance. Ces feux ont été menés dans le cadre du projet GOLIAT en collaboration avec les opérationnels Corse (SIS 2A, 2B, Service Régional Ingénierie DFCI FORSAP de la Collectivité de Corse). Le protocole expérimental adopté permet la caractérisation des parcelles en relevant les conditions météorologiques, la topographie et le couvert végétal. Lors des feux, la propagation des fronts de flammes a été enregistrée grâce à des caméras infrarouges placées sur des drones et également par l'intermédiaire de caméras disposées sur les côtés des parcelles. La vitesse de propagation ainsi que la géométrie du front et de flammes ont ainsi pu être évaluées expérimentalement.

Ces expériences ont permis l'obtention de feux de surfaces de forte puissance avec des intensités  $> 7 \text{ MW/m}$ . Les intensités trouvées indiquent que de tels feux seraient difficiles à contrôler dans le cas des phénomènes réels. Il est à noter que ces incendies ont été obtenus malgré des conditions météorologiques qui ne devaient pas être propices à des feux de forte puissance, puisque le vent était faible, la température de l'air basse et le taux d'humidité élevé. En ce qui concerne les vitesses de propagation obtenues, la valeur maximale du ROS est de  $0,45 \text{ m/s}$  et a été enregistrée lors de la première expérience à Speluncatu en mars. Ce feu s'est propagé à cette vitesse sur un terrain en pente ( $28^\circ$ ) malgré une faible vitesse de vent ambiant ( $U_3 = 1,3 \text{ m/s}$ ) et des conditions météorologiques défavorables.

L'impact du feu sur des cibles a été également évalué lors des expériences et les résultats montrent que le flux de chaleur radiatif reçu par les fluxmètres est dominant par rapport aux flux thermique convectif.

- Modélisation numérique

Les feux expérimentaux ont été étudiés numériquement à l'aide des codes physiques complets FireStar2D et 3D. Les configurations numériques avec les différentes conditions et hypothèses ont été présentées en détail dans ce document. L'objectif principal de cette étude

est de tester la capacité de ces modèles à prédire convenablement la dynamique et l'impact des feux de forte puissance. Les résultats numériques obtenus ont montré la pertinence de l'utilisation de ces modèles physiques. Les prédictions de FireStar3D montrent une meilleure concordance avec les mesures expérimentales. Ceci est dû au fait que cette version de FireStar permet de mieux représenter les conditions réelles de propagation d'un feu de forêt. En ce qui concerne l'intensité du front de flammes, quelle que soit la version de FireStar utilisée, les valeurs numériques obtenues, au même titre que les intensités évaluées expérimentalement, sont représentatives des feux de forte puissance.

### *Deuxième partie de la thèse*

La deuxième partie de la thèse était dédiée à une étude de cas qui découlait de la demande du GTI (Groupe Technique Interdépartemental) de Corse. Les membres du GTI désiraient avoir un appui scientifique à la mise en œuvre des zones de débroussaillage autour des habitations, dont les dimensions sont jusqu'à présent fixées réglementairement sur la base de recommandations formulées par des experts. Le site choisi pour l'étude est sur la Commune de Sari-Solenzara, sur la côte Est de la Corse du Sud. Cette étude a été réalisée en étroite collaboration avec les opérationnels lors du choix des modèles de végétation et des conditions météorologiques. Ces conditions sont choisies de manière à se placer dans un "cas critique", susceptible de générer un feu de forte puissance.

Des études numériques ont été menées en premier lieu afin d'évaluer la dynamique du feu (ROS, intensité) et la géométrie de la flamme (hauteur, angle d'inclinaison). Des modèles physiques simplifiés et complets, ainsi que des approches empiriques, ont été utilisées afin d'étudier le comportement de ce feu. Une comparaison des résultats montre que certaines approches empiriques fournissent des prédictions proches de ceux obtenus par des modèles physiques complets. D'autres études numériques ont été réalisées, notamment l'étude de sensibilité, sur les codes physiques FireStar, pour quantifier l'effet de la variation des

paramètres d'entrée de  $\pm 20\%$  sur la valeur du ROS. D'autres simulations ont également été menées comme celles dédiées à l'étude de la variation du ROS en fonction du vent et de la pente à l'aide FireStar 2D et 3D ainsi que du modèle physique simplifié de Balbi.

Une partie du travail a porté sur l'étude de l'impact du feu sur différents types de cibles : être humain et bâtiment à 4 niveaux. L'objectif est de calculer les distances de sécurité dans le cas d'un feu de forte puissance. L'évaluation des SSD est basée sur les flux thermiques totaux maximaux reçus par les cibles, en utilisant le modèle physique complet Firestar2D. Cette méthodologie a permis d'établir des formules analytiques entre le flux thermique total (radiatif et convectif) et la distance séparant les cibles du front de feu. Les SSD sont alors évaluées en considérant la valeur maximale du flux de chaleur thermique qui peut être reçu par la cible. Les distances de sécurité évaluées à l'aide de cette méthodologie, pour un sapeur-pompier et un bâtiment, sont inférieures à 50 mètres. Ceci confirme donc l'efficacité de la zone à débroussailler autour des habitations, fixée par les experts opérationnels et supposée égale à 50 m en France.

### *Perspectives*

Cette étude porte sur un type de feux extrêmes, à savoir des feux de surface de forte puissance qui se propagent à travers deux types de maquis corse « *Genista salzmannii* » et du maquis arboré haut de 4 m. Cette étude menée dans le cadre du projet GOLIAT, au sein du projet « Feux » de l'UMR SPE 6134 de l'Université de Corse peut aboutir à une meilleure compréhension des feux de fortes intensités en fournissant des renseignements concernant le comportement de ces derniers. Ces renseignements pourront s'avérer très utiles aux opérationnels en phase de lutte pour anticiper les actions à mettre en œuvre, tout en préservant la sécurité des hommes sur le terrain.

Une prochaine étape serait de réaliser une étude plus détaillée sur FireStar2D concernant la validation de la valeur des SSD de 50 m pour les habitations et 20 m pour les bords de route,

en considérant différentes configurations (types de végétations, conditions météo et topographie), ainsi que des différents types de cibles. Il est aussi envisageable d'évaluer l'impact des feux en utilisant le code physique complet FireStar3D avec sa nouvelle fonctionnalité qui permet d'implémenter un obstacle dans le domaine de calcul. Cette nouvelle fonctionnalité permet de simuler l'interaction entre le feu et la cible et est une avancée majeure pour ce code dans l'optique de son utilisation pour des études aux interfaces forêt-habitat. En effet, cela permet d'évaluer l'impact dans des conditions plus réalistes similaires à de véritables incendies dans les interfaces forêt-habitat (WUI).

La prochaine étape pourrait être d'étudier d'autres types de feux extrêmes, notamment la transition entre un feu de surface et un feu de cimes mais également les feux éruptifs. Ces feux, qui se caractérisent par de fortes intensités et un comportement brusque et imprévisible, peuvent vite être incontrôlables et devenir à haut risque pour les opérationnels sur le terrain. Des études numériques pourraient être réalisées à l'aide du code physique complet FireStar, afin de modéliser les différentes strates végétales pour les feux de cimes, et prendre en compte des configurations de terrain susceptibles de causer des feux éruptifs (tranchées et canyons). Des expériences à l'échelle du terrain pourraient aussi être envisageables afin d'approfondir les connaissances sur ce type de feux.

#### *Production scientifique*

Les différents travaux menés dans le cadre de cette thèse concernant les feux expérimentaux réalisés à l'échelle du terrain et les études numériques de ces feux sur les codes physiques complets FireStar2D et 3D, ainsi que l'étude numérique sur le dimensionnement des distances de sécurité SSD sur FireStar2D, ont été valorisés dans des journées internationales à comité de lecture et des conférences internationales.

- **Articles :**

1. Fayad J, Rossi L, Frangieh N, Awad C, Accary G, Chatelon F-J, Morandini F, Marcelli T, Cancellieri V, Cancellieri D, Morvan D, Pieri A, Planelles G, Costantini R, Meradji S, Rossi J-L (2022) Numerical study of an experimental high-intensity prescribed fire across Corsican *Genista salzmannii* vegetation. *Fire Safety Journal* 103600. doi:10.1016/J.FIRESAF.2022.103600.

2. Fayad J, Morandini F, Accary G, Chatelon F-J, Wandon C, Burglin A, Rossi L, Marcelli T, Cancellieri D, Cancellieri V, Morvan D, Meradji S, Pieri A, Planelles G, Costantini R, Briot P, Rossi J-L (2023) A Study of Two High Intensity Fires across Corsican Shrubland. *Atmosphere* 14, 1–21.

3. Fayad J, Accary G, Morandini F, Chatelon F-J, Rossi L, Marcelli T, Cancellieri D, Cancellieri V, Rahib Y, Morvan D, Meradji S, Pieri A, Duret J-Y, Rossi J-L (2023) Numerical Assessment of Safe Separation Distance in the Wildland Urban Interfaces. *Fire* 6, 209. doi:10.3390/FIRE6050209.

4. F.J. Chatelon, J.H. Balbi, M.G. Cruz, D. Morvan, J.L. Rossi, C. Awad, N. Frangieh, J. Fayad, T. Marcelli, Extension of the Balbi fire spread model to include the field scale conditions of shrubland fires, *Int. J. Wildl. Fire.* (2022). <https://doi.org/10.1071/WF21082>.

5. Rahib, Y., Leroy-Cancellieri, V., Cancellieri, D. et al. Study on the combustion indices of forest species using thermogravimetric analysis. *J Therm Anal Calorim* 148, 12919–12935 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12557-8>

- **Transfert technologique : Enveloppe Soleau**

Rossi, J. L., Accary, G., AWAD, C., Cancellieri, D., Cancellieri, V., Chatelon, F. J., Fayad, J., Frangieh, N., Marcelli, T., Meradji, S., Morvan, D., Morandini, F., Pieri, A., Rossi-Tisson, L., 2021, enveloppe Soleau auprès de l'INPI (OADVI, DSO2021013627)

- **Conférences :**

1. J. Fayad, G. Accary, D. Sutherland, S. Meradji, N. Frangieh, K. Moinuddin, D. Morvan, J.L. Rossi. Junction fires on sloped terrain. 9th Int. Fire Ecol. Manag. Congr., Tucson, Arizona, 2021
2. Fayad J, Rossi L, Frangieh N, Awad C, Accary G, Chatelon F-J, Morandini F, Marcelli T, Cancellieri V, Cancellieri D, Morvan D, Pieri A, Planelles G, Costantini R, Meradji S, Rossi J-L (2021) Experimental and numerical study of high intensity prescribed fire across Corsican *Genista salzmannii* vegetation. In ‘Am. Geophys. Union Fall Meet.’, New Orleans LA.(New Orleans LA).
3. Fayad J, Accary G, Sutherland D, Meradji S, Frangieh N, Moinuddin K, Morvan D, Chatelon FJ, Rossi J-L (2022) Numerical Study of Junction Fires on Sloped Terrain for Grassland Vegetation. In ‘III Int. Conf. Fire Behav. Risk’, Alghero, Italy. 112. (Alghero, Italy) doi:10.3390/environsciproc2022017112.
4. Fayad J, Rossi L, Frangieh N, Awad C, Accary G, Chatelon F-J, Morandini F, Marcelli T, Cancellieri V, Cancellieri D, Morvan D, Pieri A, Planelles G, Costantini R, Briot P, Meradji S, Rossi J-L (2022) Numerical study of high intensity experimental field fires across Corsican shrubland vegetation. In Viegas DX, Ribeiro LM (eds) ‘Adv. For. Fire Res. 2022’, Coimbra, Portugal. 1725–1732. (Coimbra, Portugal) doi:10.14195/978-989-26-2298-9\_266.
5. Accary G, Fayad J, Chatelon F-J, Frangieh N, Awad C, Meradji S, Marcelli T, Rossi J-L, Morvan D, Rossi L (2022) Simulation of induced-wind-dominated fire on sloping terrain. In Viegas DX, Ribeiro LM (eds) ‘Adv. For. Fire Res. 2022’, Coimbra, Portugal. 375–380. (Coimbra, Portugal) doi:10.14195/978-989-26-2298-9\_59.
6. Marcelli T, Fayad J, Awad C, Frangieh N, Joseph F, Burglin A, Morandini F, Cancellieri V, Cancellieri D, Morvan D, Accary G, Meradji S, Pieri A, Rossi L, Rossi JL (2022) Numerical study of a high intensity winter prescribed fire across Corsican. In ‘Fire Clim. Conf.’, Pasadena,

California. 1–7. (International Association of Wildland Fire, Missoula, Montana, USA: Pasadena, California)

7. Awad C, Fayad J, Frangieh N, Morandini F, Rossi JL, Chatelon FJ, Marcelli T, Morvan D, Accary G, Balbi J-H (2022) Impact of the bulk density on fire spread through a homogenous vegetation layer. In ‘III Int. Conf. Fire Behav. Risk’, Alghero, Italy. 1657–1664. (Alghero, Italy) doi:10.14195/978-989-26-2298-9\_254.

8. Chatelon FJ, Balbi J-H, Fayad J, Rossi J-L, Morvan D, Marcelli T, Frangieh N, Awad C, Accary G, Meradji S (2022) Physical modelling of fires spreading upslope, involved in fire eruption triggering. In Viegas DX, Ribeiro LM (eds) ‘Adv. For. Fire Res. 2022’, Coimbra, Portugal. 1740–1746. (Coimbra, Portugal) doi:10.14195/978-989-26-2298-9\_268.

9. Chatelon FJ, Cruz MG, Balbi J-H, Rossi J-L, Fayad J, Morvan D, Marcelli T, Frangieh N, Awad C (2022) A simplified physical propagation model for surface fires designed for an implementation into fire decision making tools. In Viegas DX, Ribeiro LM (eds) ‘Adv. For. Fire Res. 2022’, Coimbra, Portugal. 67–73. (Coimbra, Portugal) doi:10.14195/978-989-26-2298-9\_9.

10. Chatelon F-J, Cruz MG, Balbi J-H, Rossi J-L, Morvan D, Frangieh N, Marcelli T, Fayad J, Awad C (2022) The brand-new Bali model - A simplified physical propagation model applied to different fuel types at field scale and laboratory scale. In ‘Fire Clim. Conf.’, Pasadena, California. (International Association of Wildland Fire, Missoula, Montana, USA: Pasadena, California) <https://hal.science/hal-03898740>.

11. Frangieh N, Accary G, Chatelon F-J, Marcelli T, Méradji S, Rossi L, Awad C, Fayad J, Rossi J-L, Morvan D (2022) Use of fire safety engineering tools for fuel break design. In ‘Fire Clim. Conf.’, Pasadena, California. (International Association of Wildland Fire, Missoula, Montana, USA: Pasadena, California) <https://hal.science/hal-03899154>.

12. Frangieh N, Accary G, Rossi J-L, Morvan D, Chatelon F-J, Marcelli T, Meradji S, Rossi L, Awad C, Fayad J, Briot P (2022) Fuelbreaks design: from CFD modelling to operational tools. In Viegas DX, Ribeiro LM (eds) 'Adv. For. Fire Res. 2022', Coimbra, Portugal. 222–226. (Coimbra, Portugal) doi:10.14195/978-989-26-2298-9\_36.
13. Marcelli T, Rossi L, Accary G, Awad C, Burglin A, Cancellieri D, Cancellieri V, Chatelon F-J, Fayad J, Ferrat L, Frangieh N, Grossi H, Méradji S, Morandini F, Morvan D, Pieri A, Wandon C, Arobase.fr A, Rossi J-L (2022) GOLIAT, a project to develop tools for firefighting and land use planning. In Viegas DX, Ribeiro LM (eds) 'Adv. For. Fire Res. 2022', Coimbra, Portugal. 234–239. (Coimbra, Portugal) doi:10.14195/978-989-26-2298-9\_38.
14. Chatelon F-J, Balbi J-H, Rossi J-L, Marcelli T, Fayad J (2023) The Balbi model - A simplified physical propagation model for surface fires, development and applications. In 'Int. Conf. Mater. energy', Caserta, Italy. (Caserta, Italy)
15. Fayad J, Rossi L, Accary G, Chatelon F-J, Morandini F, Marcelli T, Cancellieri V, Cancellieri D, Morvan D, Pieri A, Planelles G, Costantini R, Meradji S, Briot P, Rossi J-L Investigation of high intensity surface fire behaviors across corsican shrubland vegetation. In 'Int. Conf. Mater. energy', Caserta, Italy. 2023. (Caserta, Italy)
16. Marcelli T, Rossi L, Rossi J-L, Chatelon F-J, Fayad J, Cancellieri V, Cancellieri D, Ferrat L, Morandini F, Pieri A, Burglin A, Morvan D, Accary G, Meradji S, Battesti M, Ruiz V, Blanc S, Briot P, Planelles G, Costantini R (2023) GOLIAT, a project to improve knowledge and develop tools for firefighting and land-use planning. In 'Int. Conf. Mater. energy', Caserta, Italy. (Caserta, Italy)
17. Rossi J-L, Fayad J, Chatelon F-J, Marcelli T, Meradji S, Cancellieri D, Rahib Y, Accary G, Morvan D, Rossi L, Briot P, Pieri A, Morandini F (2023) Separation safety distances in wildland urban interfaces. In 'Int. Conf. Mater. energy', Caserta, Italy. (Caserta, Italy)

# Bibliographie

---

- [1] H.H. Chapman, Is the Longleaf Type a Climax?, *Fire Ecol.* 9 (2013) 2–7. <https://doi.org/10.1007/BF03400625>.
- [2] European Commission, JRC Technical Report Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2018, 2018. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/forest-fires-europe-middle-east-and-north-africa-2018>.
- [3] F.M.C. Castro Rego, J.M. Moreno Rodriguez, V.R. Vallejo Calzada, G. Xanthopoulos, Forest Fires - Sparking firesmart policies in the EU, Research & Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018. <https://doi.org/10.2777/181450>.
- [4] E.U.R. En, Advance Report on Forest Fires in Europe , Middle East and North Africa 2021, 2021. <https://doi.org/10.2760/039729>.
- [5] Le Parisien, Feux de forêt : 785000 ha de surfaces brûlés en 2022, nouveau record en Europe, (2022). <https://www.leparisien.fr/faits-divers/feux-de-foret-785000-ha-de-surfaces-brules-en-2022-nouveau-record-en-europe-13-12-2022-HLVEFM577JE7PBBHFAPG24252U.php> (accessed August 31, 2023).
- [6] Crisis24, Saison des feux de forêt aux États-Unis – Mai à août 2022, (n.d.). <https://crisis24.garda.com/fr/perspectives-renseignements/perspectives/articles/saison-des-feux-de-foret-aux-etats-unis-mai-a-aout-2022> (accessed August 31, 2023).
- [7] Camille Adaoust, Incendies au Canada : sécheresse, évacuations, qualité de l’air... Ce que l’on sait des feux de forêt “sans précédent” qui ravagent l’Alberta, (n.d.). <https://www.francetvinfo.fr/faits-divers/incendie/incendies-au-canada-secheresse-evacuations-qualite-de-l-air-ce-que-l-on-sait-des-feux-de-foret-sans-precedent-qui->

- ravagent-l-alberta\_5811989.html (accessed August 31, 2023).
- [8] M. Blumler, Three Conflated Definitions of Mediterranean Climates, *Middle States Geogr.* 38 (2005) 52–60.
- [9] F. di Castri, H.A. Mooney, *Mediterranean Type Ecosystems: Origin and Structure*, Springer Berlin Heidelberg, 1973.
- [10] M. Salis, Fire Behaviour Simulation in Mediterranean Maquis using FARSITE (Fire Area Simulator), 2008. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17826.68800>.
- [11] J. San-Miguel-Ayanz, J.M. Moreno, A. Camia, Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives, *For. Ecol. Manage.* 294 (2013) 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050>.
- [12] R. Vélez, *Protection contre les incendies de forêt: principes et méthodes d'action*, Zaragoza, 1999.
- [13] P. Padilla, Forgotten Fires: Native Americans and the Transient Wilderness, *Nat. Resour. J.* 44 (2004) 1263. <https://doi.org/10.2307/25606129>.
- [14] M. Flannigan, A.S. Cantin, W.J. De Groot, M. Wotton, A. Newbery, L.M. Gowman, Global wildland fire season severity in the 21st century, *For. Ecol. Manage.* 294 (2013) 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.022>.
- [15] A. Ganteaume, M. Jappiot, What causes large fires in Southern France, *For. Ecol. Manage.* 294 (2013) 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.055>.
- [16] J.C. Liu, L.J. Mickley, M.P. Sulprizio, F. Dominici, X. Yue, K. Ebisu, G.B. Anderson, R.F.A. Khan, M.A. Bravo, M.L. Bell, Particulate air pollution from wildfires in the Western US under climate change, *Clim. Change.* 138 (2016) 655–666. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1762-6>.
- [17] Copernicus, Europe's summer wildfire emissions highest in 15 years, (n.d.). <https://atmosphere.copernicus.eu/europes-summer-wildfire-emissions-highest-15->

years?utm\_source=press&utm\_medium=outreach&utm\_campaign=Summer+2022+Wildfires&utm\_id=S22WF (accessed September 13, 2023).

- [18] IPCC, Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK, 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00250-9>.
- [19] E. Directorate, E.P. Committee, 1 Past , present and projected ( extreme ) wildfire trends, (2022).
- [20] D. Thomas, D. Butry, S. Gilbert, D. Webb, J. Fung, The Costs and Losses of Wildfires: A Literature Survey (NIST Special Publication 1215), 2017. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1215>.
- [21] R.M. Cowling, P.W. Rundel, B.B. Lamont, M.K. Arroyo, M. Arianoutsou, Plant diversity in mediterranean-climate regions, Trends Ecol. Evol. 11 (1996) 362–366. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(96\)10044-6](https://doi.org/10.1016/0169-5347(96)10044-6).
- [22] R.T. Watson, V.H. Heywood, I. Baste, B. Dias, R. Gámez, T. Janetos, W. Reid, G. Ruark, Global Biodiversity Assessment: Summary for Policy Makers, Cambridge University Press, 1995. <https://doi.org/10.2307/2999726>.
- [23] F. di Castri, Mediterranean-type shrublands of the world., Elsevier, Amsterdam, 1981.
- [24] A.L. Sullivan, Inside the Inferno : Fundamental Processes of Wildland Fire Behaviour Part 2: Heat Transfer and Interactions, Fire Sci. Manag. 3 (2017) 150–171. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0058-z>.
- [25] C. Chandler, P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud, D. Williams, Fire in forestry. Volume 1. Forest fire behavior and effects. Volume 2. Forest fire management and organization., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1983.
- [26] M. Rochoux, Vers une meilleure prévision de la propagation d’incendies de forêt :

évaluation de modèles et assimilation de données, École centrale Paris, 2014.

- [27] D. Morvan, J.L. Dupuy, Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation, *Combust. Flame.* 127 (2001) 1981–1994. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(01\)00302-9](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(01)00302-9).
- [28] J.-L. Dupuy, Les apports possibles de la physique du feu à la conception et à l’entretien des coupures de combustible, *Forêt Méditerranéenne.* XXI (2000) 497–510. <http://www.incendies-de-foret.org/recherche/1998-1/pif2000-17.pdf>.
- [29] G.M. Byram, G.M. Jemison, Solar radiation and forest fuel moisture, *J. Agric. Res.* 67 (1943) 149–176.
- [30] M.P. Plucinski, W.R. Anderson, Laboratory determination of factors influencing successful point ignition in the litter layer of shrubland vegetation, *Int. J. Wildl. Fire.* 17 (2008) 628. <https://doi.org/10.1071/wf07046>.
- [31] A.P. Dimitrakopoulos, I.D. Mitsopoulos, K. Gatoulas, Assessing ignition probability and moisture of extinction in a Mediterranean grass fuel, *Int. J. Wildl. Fire.* 19 (2010) 29–34. <https://doi.org/10.1071/WF08124>.
- [32] B. Shotorban, B.L. Yashwanth, S. Mahalingam, D.J. Haring, An investigation of pyrolysis and ignition of moist leaf-like fuel subject to convective heating, *Combust. Flame.* 190 (2018) 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.11.008>.
- [33] J.P. Argañaraz, M.A. Landi, C.M. Scavuzzo, L.M. Bellis, Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system, *PLoS One.* 13 (2018) 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204889>.
- [34] P.E. Dennison, M.A. Moritz, Critical live fuel moisture in chaparral ecosystems: a threshold for fire activity and its relationship to antecedent precipitation, *Int. J. Wildl. Fire.* 18 (2009) 1021–1027. <https://doi.org/10.1071/WF08055>.
- [35] A.A. Brown, K.P. Davis, *Forest fire: control and use*, 2nd ed., McGraw-Hill Book

- Company, New-York, USA, 1973.
- [36] J.K. Agee, C.N. Skinner, Basic principles of forest fuel reduction treatments, *For. Ecol. Manage.* 211 (2005) 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.01.034>.
- [37] R. Rachmawati, M. Ozlen, K.J. Reinke, J.W. Hearne, An optimisation approach for fuel treatment planning to break the connectivity of high-risk regions, *For. Ecol. Manage.* 368 (2016) 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.014>.
- [38] La prévention des feux de forêts | La préfecture et les services de l'État en région Corse, (n.d.). <https://www.prefectures-regions.gouv.fr/corse/Grands-dossiers/Securite/La-prevention-des-feux-de-forets> (accessed August 31, 2023).
- [39] C.E. Van Wagner, Conditions for the start and spread of crown fire, *Can. J. For. Res.* 7 (1977) 23–34. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1139/x77-004>.
- [40] D.X. Viegas, Forest fire propagation, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 356 (1998) 2907–2928. <https://doi.org/10.1098/rsta.1998.0303>.
- [41] J.-L. Dupuy, J. Maréchal, Slope effect on laboratory fire spread: contribution of radiation and convection to fuel bed preheating, *Int. J. Wildl. Fire.* 20 (2011) 289. <https://doi.org/10.1071/wf09076>.
- [42] R.C. Rothermel, A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, USDA Forest Service, Research Paper INT-115, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, 1972. [https://doi.org/http://www.snap.uaf.edu/webshared/JenNorthway/AKFireModelingWorkshop/AKFireModelingWkshp/FSPRO Analysis Guide References/Rothermel 1972 INT-115.pdf](https://doi.org/http://www.snap.uaf.edu/webshared/JenNorthway/AKFireModelingWorkshop/AKFireModelingWkshp/FSPRO%20Analysis%20Guide%20References/Rothermel%201972%20INT-115.pdf).
- [43] D.X. Viegas, L.P. Pita, Fire spread in canyons, *Int. J. Wildl. Fire.* 13 (2004) 253–274. <https://doi.org/10.1071/WF03050>.
- [44] B.W. Butler, W.R. Anderson, E.A. Catchpole, Influence of Slope on Fire Spread Rate,

- USDA For. Serv. Proc. (2007) 75–82.
- [45] T. Šturm, P.M. Fernandes, R. Šumrada, The Canadian fire weather index system and wildfire activity in the Karst forest management area, Slovenia, *Eur. J. For. Res.* 131 (2012) 829–834. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0556-7>.
- [46] G.M. Byram, Combustion of forest fuels. In: Davis, K.P., ed. *Forest fire: control and use.*, in: New York McGraw Hill, 1959: pp. 61–89.
- [47] W.M. Pitts, Wind effects on fires, *Prog. Energy Combust. Sci.* 17 (1991) 83–134. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(91\)90017-H](https://doi.org/10.1016/0360-1285(91)90017-H).
- [48] H.E. Anderson, R.C. Rothermel, Influence of moisture and wind upon the characteristics of free-burning fires, *Symp. Combust.* 10 (1965) 1009–1019. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(65\)80243-0](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(65)80243-0).
- [49] R.C. Rothermel, H.E. Anderson, Fire spread characteristics determined in the laboratory, USDA Forest Service, Research Paper INT-30, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, 1966.
- [50] M.E. Alexander, Calculating and interpreting forest fire intensities, *Can. J. Bot.* 60 (1982) 349–357. <https://doi.org/10.1139/b82-048>.
- [51] W. Anderson, E. Pastor, B. Butler, E. Catchpole, J.-L. Dupuy, P. Fernandes, M. Guijarro, J.-M. Mendes-Lopes, J. Ventura, Evaluating models to estimate flame characteristics for free-burning fires using laboratory and field data, *For. Ecol. Manage.* 234 (2006) S77. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.113>.
- [52] J.L. Rossi, F.J. Chatelon, T. Marcelli, Fire Intensity, in: S.L. Manzello (Ed.), *Encycl. Wildfires Wildland-Urban Interface Fires*, Springer International Publishing, Cham, 2018: pp. 1–6. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_51-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_51-1).
- [53] M.E. Alexander, M.G. Cruz, Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height, *Int. J. Wildl. Fire.*

- 21 (2012) 95–113. <https://doi.org/10.1071/WF11001>.
- [54] J.M. Johnston, M.J. Wooster, R. Paugam, X. Wang, T.J. Lynham, L.M. Johnston, Direct estimation of Byram's fire intensity from infrared remote sensing imagery, *Int. J. Wildl. Fire*. 26 (2017) 668–684. <https://doi.org/10.1071/WF16178>.
- [55] D. Morvan, Numerical study of the effect of fuel moisture content (FMC) upon the propagation of a surface fire on a flat terrain, *Fire Saf. J.* 58 (2013) 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.01.010>.
- [56] D. Morvan, S. Méradji, G. Accary, Physical modelling of fire spread in Grasslands, *Fire Saf. J.* 44 (2009) 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.03.004>.
- [57] D. Morvan, G. Accary, S. Meradji, N. Frangieh, O. Bessonov, A 3D physical model to study the behavior of vegetation fires at laboratory scale, *Fire Saf. J.* 101 (2018) 39–52. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2018.08.011>.
- [58] N. Frangieh, G. Accary, D. Morvan, S. Méradji, O. Bessonov, Wildfires front dynamics: 3D structures and intensity at small and large scales, *Combust. Flame*. 211 (2020) 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.017>.
- [59] J. Fayad, F. Morandini, G. Accary, F. Chatelon, C. Wandon, A. Burglin, L. Rossi, T. Marcelli, D. Cancellieri, V. Cancellieri, D. Morvan, S. Meradji, A. Pieri, G. Planelles, R. Costantini, P. Briot, J.-L. Rossi, A Study of Two High Intensity Fires across Corsican Shrubland, *Atmosphere (Basel)*. 14 (2023) 1–21.
- [60] K. Chatto, K.G. Tolhurst, A review of the relationship between fireline intensity and the ecological and economic effects of fire, Melbourne, 2004.
- [61] P.N. Cheney, Fire behaviour, in: A. Gill, R. Grooves, I. Noble (Eds.), *Fire Aust. Biota*, Australian Academy of Science, Canberra, ACT, 1981: pp. 151–175.
- [62] G. Byram, Atmospheric conditions related to blowup fires, Asheville, North Carolina, 1954.

- [63] J.J. Sharples, G.J. Cary, P. Fox-Hughes, S. Mooney, J.P. Evans, M.S. Fletcher, M. Fromm, P.F. Grierson, R. McRae, P. Baker, Natural hazards in Australia: extreme bushfire, *Clim. Change*. 139 (2016) 85–99. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1811-1>.
- [64] G. Pescaroli, D. Alexander, A definition of cascading disasters and cascading effects : Going beyond the “ toppling dominos ” metaphor, *GRF Davos Planet@Risk*. 3 (2015) 58–67.
- [65] F. Tedim, V. Leone, M. Amraoui, C. Bouillon, M. Coughlan, G. Delogu, P. Fernandes, C. Ferreira, S. McCaffrey, T. McGee, J. Parente, D. Paton, M. Pereira, L. Ribeiro, D. Viegas, G. Xanthopoulos, Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts, *Fire*. 1 (2018) 9. <https://doi.org/10.3390/fire1010009>.
- [66] R. McRae, J. Sharples, A conceptual framework for assessing the risk posed by extreme bushfires, *Aust. J. Emerg. Manag.* 26 (2011) 47–53.
- [67] P. Costa, M. Castellnou, A. Larrañaga, M. Miralles, D. Kraus, Prevention of Large Wildfires using the Fire Types Concept, 2011. [https://www.researchgate.net/publication/263923019\\_Prevention\\_of\\_Large\\_Wildfires\\_using\\_the\\_Fire\\_Types\\_Concept](https://www.researchgate.net/publication/263923019_Prevention_of_Large_Wildfires_using_the_Fire_Types_Concept).
- [68] F. Castro Rego, P. Morgan, P. Fernandes, C. Hoffman, Extreme Fire, ACT Government and Bushfire Cooperative Research Centre. Cover, 2010. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7_8).
- [69] R. Barbero, J.T. Abatzoglou, E.A. Steel, N.K. Larkin, Modeling very large-fire occurrences over the continental United States from weather and climate forcing, *Environ. Res. Lett.* 9 (2014) 11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124009>.
- [70] R. Barbero, J.T. Abatzoglou, N.K. Larkin, C.A. Kolden, B. Stocks, Climate change presents increased potential for very large fires in the contiguous United States, *Int. J. Wildl. Fire*. 24 (2015) 892–899. <https://doi.org/10.1071/WF15083>.

- [71] P.M. Fernandes, T. Monteiro-Henriques, N. Guiomar, C. Loureiro, A.M.G. Barros, Bottom-Up Variables Govern Large-Fire Size in Portugal, *Ecosystems*. 19 (2016) 1362–1375. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0010-2>.
- [72] A.J. O'Donnell, M.M. Boer, W.L. Mccaw, P.F. Grierson, Scale-dependent thresholds in the dominant controls of wildfire size in semi-arid southwest Australia, *Ecosphere*. 5 (2014). <https://doi.org/10.1890/ES14-00145.1>.
- [73] INCF, *Análise das causas dos incêndios florestais 2003-2013*, 2014.
- [74] A. Cardil, M. Salis, D. Spano, G. Delogu, D.M. Terrén, Large wildland fires and extreme temperatures in Sardinia (Italy), *IForest*. 7 (2014) 162–169. <https://doi.org/10.3832/ifor1090-007>.
- [75] A.P. Dimitrakopoulos, M. Vlahou, C.G. Anagnostopoulou, I.D. Mitsopoulos, Impact of drought on wildland fires in Greece: Implications of climatic change?, *Clim. Change*. 109 (2011) 331–347. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0026-8>.
- [76] B.G. Dickson, J.W. Prather, Y. Xu, H.M. Hampton, E.N. Aumack, T.D. Sisk, Mapping the probability of large fire occurrence in northern Arizona, USA, *Landsc. Ecol*. 21 (2006) 747–761. <https://doi.org/10.1007/s10980-005-5475-x>.
- [77] R.A. Bradstock, J.S. Cohn, A.M. Gill, M. Bedward, C. Lucas, Prediction of the probability of large fires in the Sydney region of south-eastern Australia using fire weather, *Int. J. Wildl. Fire*. 18 (2009) 932–943. <https://doi.org/10.1071/WF08133>.
- [78] J.L. Beverly, D.L. Martell, Characterizing extreme fire and weather events in the Boreal Shield ecozone of Ontario, *Agric. For. Meteorol*. 133 (2005) 5–16. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2005.07.015>.
- [79] C.S. Olsen, B.A. Shindler, Trust, acceptance, and citizenagency interactions after large fires: Influences on planning processes, *Int. J. Wildl. Fire*. 19 (2010) 137–147. <https://doi.org/10.1071/WF08168>.

- [80] I. Mitsopoulos, G. Mallinis, A data-driven approach to assess large fire size generation in Greece, *Nat. Hazards*. 88 (2017) 1591–1607. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2934-z>.
- [81] N.K. Larkin, J.T. Abatzoglou, R. Barbero, C.A. Kolden, D. Mckenzie, B. Potter, E.N. Stavros, E.A. Steel, B.J. Stocks, K. Craig, S.A. Drury, S.-M. Huang, H. Podschwit, S. Raffuse, T. Strand, *Future megafires and smoke impacts*, 2015.
- [82] R. Barbero, J.T. Abatzoglou, T.J. Brown, Seasonal reversal of the influence of El Niño-Southern Oscillation on very large wildfire occurrence in the interior northwestern United States, *Geophys. Res. Lett.* 42 (2015) 3538–3545. <https://doi.org/10.1002/2015GL063428>.
- [83] P.M. Fernandes, A.M.G. Barros, A. Pinto, J.A. Santos, Characteristics and controls of extremely large wildfires in the western Mediterranean Basin, *J. Geophys. Res. Biogeosciences*. 121 (2016) 2141–2157. <https://doi.org/10.1002/2016JG003389>.
- [84] A. Meyn, P.S. White, C. Buhk, A. Jentsch, Environmental drivers of large, infrequent wildfires: The emerging conceptual model, *Prog. Phys. Geogr.* 31 (2007) 287–312. <https://doi.org/10.1177/0309133307079365>.
- [85] J. Williams, The 1910 Fires a Century Later: Could They Happen Again?, in: *Inl. Emp. Soc. Am. For. Annu. Meet.*, Wallace, ID, USA, 2010: pp. 20–22.
- [86] J. Williams, D. Albright, A.A. Hoffmann, A. Eritsov, P.F. Moore, J.C. Mendes De Morais, M. Leonard, J. San-Miguel-Ayanz, G. Xanthopoulos, P. van Lierop, Findings and Implications from a Coarse-Scale Global Assessment of Recent Selected Mega-Fires, 2009. <http://www.mdpi.com/1996-1073/2/3/556/>.
- [87] F. Tedim, G. Xanthopoulos, V. Leone, Chapter 5 - Forest Fires in Europe: Facts and Challenges, in: J.F. Shroder, D.B.T.-W.H. Paton *Risks and Disasters* (Eds.), *Wildfire Hazards, Risks and Disasters*, Elsevier, Oxford, 2015: pp. 77–99.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410434-1.00005-1>.

- [88] Y. Liu, S. Goodrick, J. Stanturf, H. Tian, Impacts of Mega-Fire on Large U.S. Urban Area Air Quality under Changing Climate, Athens, GA, USA, 2004. [http://shrmc.ggy.uga.edu/mega\\_fires.php](http://shrmc.ggy.uga.edu/mega_fires.php).
- [89] D.M.J.S. Bowman, G.J. Williamson, J.T. Abatzoglou, C.A. Kolden, M.A. Cochrane, A.M.S. Smith, Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events, *Nat. Ecol. Evol.* 1 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41559-016-0058>.
- [90] K.O. Lannom, W.T. Tinkham, A.M.S. Smith, J. Abatzoglou, B.A. Newingham, T.E. Hall, P. Morgan, E.K. Strand, T.B. Paveglio, J.W. Anderson, A.M. Sparks, Defining extreme wildland fires using geospatial and ancillary metrics, *Int. J. Wildl. Fire.* 23 (2014) 322–337. <https://doi.org/10.1071/WF13065>.
- [91] S. Oliveri, G. Gerosa, M. Pregolato, MANFRED project – Regional Report on extreme fire occurrences. Report on Extreme Fire Occurrences at Alpine Scale, 2012. <http://www.manfredproject.eu/>.
- [92] P.A. Werth, B.E. Potter, M.E. Alexander, C.B. Clements, M.G. Cruz, M.A. Finney, J.M. Forthofer, S.L. Goodrick, C. Hoffman, W.M. Jolly, S.S. McAllister, R.D. Ottmar, R.A. Parsons, Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: Volume 2 for Fire Behavior Specialists, Researchers, and Meteorologists, Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-891. 2 (2016) 258.
- [93] D.X. Viegas, A. Simeoni, Eruptive Behaviour of Forest Fires, *Fire Technol.* 47 (2011) 303–320. <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0193-6>.
- [94] D.X. Viegas, A mathematical model for forest fires blowup, *Combust. Sci. Technol.* 177 (2005) 27–51. <https://doi.org/10.1080/00102200590883624>.
- [95] D.X. Viegas, Parametric study of an eruptive fire behaviour model, *Int. J. Wildl. Fire.* 15 (2006) 169–177. <https://doi.org/10.1071/WF05050>.

- [96] S.J. Pyne, P.L. Andrews, R.D. Laven, *Introduction to Wildland Fire : Fire Management in the United States*, Second Ed., John Wiley and Sons Ltd, New York, United States, 1996.
- [97] C.M. Countryman, M.A. Fosberg, R.C. Rothermel, M.J. Schroeder, Fire weather and fire behavior in the 1966 loop fire, *Fire Technol.* 4 (1968) 126–141.  
<https://doi.org/10.1007/BF02588629>.
- [98] R.C. Rothermel, *Mann Gulch Fire: A race that couldn't be won*, 1993.
- [99] D.X. Viegas, *Recent Forest Fire Related Accidents in Europe*, 2009.  
<https://doi.org/10.2788/50781>.
- [100] J. Dold, A. Simeoni, A. Zinoviev, R. Weber, The Palasca Fire, September 2000: eruption or flashover?, *Recent For. Fire Relat. Accid. Eur.* (2009) 54–64.
- [101] D.X. Viegas, M.G. Cruz, L.M. Ribeiro, A.J. Silva, A. Ollero, B. Arrue, R. Dios, F. Gómez-Rodríguez, L. Merino, A.I. Miranda, P. Santos, Gestosa fire spread experiments, in: D.X. Viegas (Ed.), *For. Fire Res. Wildl. Fire Saf. Proc. IV Int. Conf. For. Fire Res. 2002 Wildl. Fire Saf. Summit*, Luso, Coimbra, Port. 18-23 Novemb. 2002, Millpress, Rotherdam, Coimbra, Portugal, 2002: p. 13.
- [102] J.W. Dold, A. Zinoviev, Fire eruption through intensity and spread rate interaction mediated by flow attachment, *Combust. Theory Model.* 13 (2009) 763–793.  
<https://doi.org/10.1080/13647830902977570>.
- [103] J. Sharples, A. Gill, J. Dold, The Trench Effect and Eruptive Wildfires: Lessons from the King's Cross Underground Disaster, in: *Aust. Fire Emerg. Serv. Authorities Council. 2010 Conf.*, Darwin, 2010.
- [104] S. Simcox, N.S. Wilkes, I.P. Jones, Computer simulation of the flows of hot gases from the fire at King's Cross Underground station, *Fire Saf. J.* 18 (1992) 49–73.  
[https://doi.org/10.1016/0379-7112\(92\)90047-G](https://doi.org/10.1016/0379-7112(92)90047-G).

- [105] D.D. Drysdale, A.J.R. Macmillan, Flame spread on inclined surfaces, *Fire Saf. J.* 18 (1992) 245–254. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(92\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0379-7112(92)90018-8).
- [106] F.-J. Chatelon, S. Sauvagnargues, G. Dusserre, J.-H. Balbi, Generalized Blaze Flash, a “Flashover” Behavior for Forest Fires—Analysis from the Firefighter’s Point of View, *Open J. For.* 04 (2014) 547–557. <https://doi.org/10.4236/ojf.2014.45059>.
- [107] B.W. Butler, R.A. Bartlette, L.S. Bradshaw, J.D. Cohen, P.L. Andrews, T. Putnam, R.J. Mangan, Fire Behavior Associated with the 1994 South Canyon Fire on Storm King Mountain, Colorado, Rocky Mountain Research Station, 1998.
- [108] Victorian 2009 Bushfire Research Response Interim Report June 2009, 2009.
- [109] N.P. Cheney, G.A.V. Bary, The propagation of mass conflagrations in a standing eucalypt forest by the spotting process, in: *Mass Fire Symp. Collect. Pap.*, Commonwealth of Australia, Defence Standards Laboratories: Melbourne, Vic., Canberra, Australia, 1969: pp. 1–11.
- [110] R.I. Emori, K. Saito, Model experiment of hazardous forest fire whirl, *Fire Technol.* 18 (1982) 319–327. <https://doi.org/10.1007/BF02473115>.
- [111] F. Castro Rego, P. Morgan, P. Fernandes, C. Hoffman, Extreme Fires, in: A.G. and B.C.R. Centre (Ed.), 2021: pp. 175–257. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7_8).
- [112] A.R. Pirsko, L.M. Sergius, C.W. Hickerson, Causes and Behavior of a Tornadic Fire-Whirlwind, Berkeley, California, 1965. <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>.
- [113] Do.A. Haines, G.H. Updike, Fire whirl/wind formation over flat terrain, Folwell, Minnesota, 1971.
- [114] E. Frankenberg, D. McKee, D. Thomas, Health consequences of forest fires in Indonesia, 2004. <https://doi.org/10.1353/dem.2005.0004>.
- [115] B. Butler, J. Cohen, Firefighter Safety Zones: A Theoretical Model Based on Radiative

- Heating, *Int. J. Wildl. Fire.* 8 (1998) 73–77. <https://doi.org/10.1071/WF9980073>.
- [116] J.Q. Zhang, S.X. Lu, M. Yuan, C.H. Li, Q. Li, Safe separation distance calculation model with changing area of fuel packages in large space, *Procedia Eng.* 11 (2011) 666–674. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.711>.
- [117] J.L. Rossi, A. Simeoni, B. Moretti, V. Leroy-Cancellieri, An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires, *Fire Saf. J.* 46 (2011) 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.07.007>.
- [118] P.M. Fernandes, H.S. Botelho, A review of prescribed burning effectiveness in fire hazard reduction, *Int. J. Wildl. Fire.* 12 (2003) 117–128. <https://doi.org/10.1071/WF02042>.
- [119] K. Hirsch, D. Martell, A Review of Initial Attack Fire Crew Productivity and Effectiveness, *Int. J. Wildl. Fire.* 6 (1996) 199–215. <https://doi.org/10.1071/WF9960199>.
- [120] B.M. Wotton, M.D. Flannigan, G.A. Marshall, Potential climate change impacts on fire intensity and key wildfire suppression thresholds in Canada, *Environ. Res. Lett.* 12 (2017) 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7e6e>.
- [121] R. Chevrou, *Incendies de forêts catastrophes : prévention et protection*, Conseil général du génie rural, des eaux et des forêts (CGGREF), Paris, 2000.
- [122] M.E. Alexander, F.V. Cole, Predicting and interpreting fire intensities in Alaskan black spruce forests using the Canadian system of fire danger rating, in: *Manag. For. to Meet People's Needs Proc. 1994 Soc. Am. For. Inst. For. Conv. Soc. Am. For.*, SAF Publication 95-02, Bethesda, 1995: pp. 185–192.
- [123] P.L. Andrews, R.C. Rothermel, *Charts for interpreting wildland fire behavior characteristics.*, 1982.
- [124] M.E. Alexander, R.A. Lanoville, *Predicting Fire Behavior in the black spruce-lichen*

- woodland fuel type of western and northern Canada., For. Can., North. For. Cent., Edmonton, Alberta, Gov. Northwest Territ. Dep. Renew. Resour., Territ. For. Fire Cent., Fort Smith, Northwest Territ. Poster (with Text). (1989) 17.
- [125] D.X. Viegas, C. Rossa, D. Caballero, L.P.C. Pita, P. Palheiro, Analysis of accidents in 2005 fires in Portugal and Spain, For. Ecol. Manage. 234 (2006) S141. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.08.188>.
- [126] D.M. Molina-Terrén, G. Xanthopoulos, M. Diakakis, L. Ribeiro, D. Caballero, G.M. Delogu, D.X. Viegas, C.A. Silva, A. Cardil, Analysis of forest fire fatalities in Southern Europe: Spain, Portugal, Greece and Sardinia (Italy), Int. J. Wildl. Fire. 28 (2019) 85–98. <https://doi.org/10.1071/WF18004>.
- [127] M. Li, F. Shen, X. Sun, 2019–2020 Australian bushfire air particulate pollution and impact on the South Pacific Ocean, Sci. Rep. 11 (2021) 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91547-y>.
- [128] A.D.; Syphard, J.E.; Keeley, M.; Gough, M.; Lazarz, J. Rogan, A.D. Syphard, J.E. Keeley, M. Gough, M. Lazarz, J. Rogan, What Makes Wildfires Destructive in California?, Fire 2022, Vol. 5, Page 133. 5 (2022) 133. <https://doi.org/10.3390/FIRE5050133>.
- [129] F. Buccio, Incendies été 2022 - Gironde et Landes, Retour d’expérience, 2022.
- [130] Portugal : plus de 100 000 hectares brûlés par les feux de forêt cette année, SudOuest.Fr. (2022). <https://www.sudouest.fr/environnement/portugal-plus-de-100-000-hectares-brules-par-les-feux-de-foret-cette-annee-12023067.php> (accessed April 5, 2023).
- [131] UNDRR, Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, Geneva, Switzerland, 2015.
- [132] IAWF issue Paper: Extreme Fires, Wildfire Mag. (2019) 14–17.
- [133] K. Kemper, How governments can take action to limit extreme wildfires, World Bank

- Blogs. (2020). <https://blogs.worldbank.org/climatechange/how-governments-can-take-action-limit-extreme-wildfires> (accessed September 2, 2023).
- [134] J.-L. Rossi, B. Komac, M. Migliorini, R. Schwarze, Sigmund Zvonko, C. Awad, F.-J. Chatelon, J.G. Goldammer, T. Marcelli, D. Morvan, A. Simeoni, B. Thiebes, Evolving Risk of Wildfires in Europe - The changing nature of wildfire risk calls for a shift in policy focus from suppression to prevention, Brussels, Belgium, 2020. <https://www.undrr.org/publication/evolving-risk-wildfires-europe-thematic-paper-european-science-technology-advisory>.
- [135] Commission for Environmental Cooperation, The North American Mosaic: An Overview of Key Environmental Issues, Communications Department of the CEC Secretariat, 2008.
- [136] M.M. Boer, V. Resco de Dios, R.A. Bradstock, Unprecedented burn area of Australian mega forest fires, *Nat. Clim. Chang.* 2020 103. 10 (2020) 171–172. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0716-1>.
- [137] J. Ruffault, T. Curt, N.K. Martin-Stpaul, V. Moron, R.M. Trigo, Extreme wildfire events are linked to global-change-type droughts in the northern Mediterranean, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18 (2018) 847–856. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-847-2018>.
- [138] J.V. Hofman, Meteorological factors and forest fires, *Mon. Weather Rev.* (1923) 569.
- [139] S.H. Doerr, C. Santín, Global trends in wildfire and its impacts: Perceptions versus realities in a changing world, *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 371 (2016). <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0345>.
- [140] A. Duane, M. Castellnou, L. Brotons, Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events Content courtesy of Springer Nature , terms of use apply . Rights reserved . Content courtesy of Springer Nature , terms of use apply . Rights reserved ., *Climatic Chang.* 165 (2021) 1–22.

- [141] E.A. Beals, The value of weather forecasts in the problem of protecting forests from fire, *Mon. Weather Rev.* (1914) 111–119.
- [142] M.A. Fosberg, R. Rothermel, P.L. Andrews, Moisture content calculations for 1000-hour timelag fuels, *For. Sci.* 27 (1981) 19–26. [https://www.fs.fed.us/psw/publications/fosberg/psw\\_1981\\_fosberg001.pdf](https://www.fs.fed.us/psw/publications/fosberg/psw_1981_fosberg001.pdf).
- [143] E. Chuvieco, I. González, F. Verdú, I. Aguado, M. Yebra, Prediction of fire occurrence from live fuel moisture content measurements in a Mediterranean ecosystem, *Int. J. Wildl. Fire.* 18 (2009) 430. <https://doi.org/10.1071/WF08020>.
- [144] L.R. Green, *Burning by prescription in chaparral*, 1981.
- [145] D.R. Weise, R.A. Hartford, L. Mahaffey, Assessing live fuel moisture for fire management applications, *Fire Ecosyst. Manag. Shifting Paradig. from Suppr. to Prescr.* (1998) 49–55.
- [146] S. Modugno, H. Balzter, B. Cole, P. Borrelli, Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe, *J. Environ. Manage.* 172 (2016) 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.013>.
- [147] A.L. Westerling, A. Gershunov, T.J. Brown, D.R. Cayan, M.D. Dettinger, Climate and wildfire in the western United States, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 84 (2003) 595–604. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-5-595>.
- [148] A. Ganteaume, R. Barbero, M. Jappiot, E. Maillé, Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface, *J. Saf. Sci. Resil.* 2 (2021) 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2021.01.001>.
- [149] C.D. Whiteman, *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*, Oxford University Press, New York, 2000. <https://doi.org/10.1093/OSO/9780195132717.001.0001>.
- [150] H. Brown, Thirtymile Fire: fire behavior and management response, *Fire Manag. Today*.

- 62 (2002) 23–30. <https://doi.org/10.48044/jauf.1978.064>.
- [151] P. Cheney, A. Sullivan, Grassfires: Fuel, weather and fire behaviour, 2nd Editio, CSIRO PUBLISHING, 2008. <https://www.publish.csiro.au/book/5971/>.
- [152] D.R. Weise, G.S. Biging, A qualitative comparison of fire spread models incorporating wind and slope effects, *For. Sci.* 43 (1997) 170–180.
- [153] R. Linn, J. Winterkamp, C. Edminster, J.J. Colman, W.S. Smith, Coupled influences of topography and wind on wildland fire behaviour, *Int. J. Wildl. Fire.* 16 (2007) 183–195. <https://doi.org/10.1071/WF06078>.
- [154] Y. Wu, H.J. Xing, G. Atkinson, Interaction of fire plume with inclined surface, *Fire Saf. J.* 35 (2000) 391–403. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00032-1).
- [155] J.L. Dupuy, J. Maréchal, D. Portier, J.C. Valette, The effects of slope and fuel bed width on laboratory fire behaviour, *Int. J. Wildl. Fire.* 20 (2011) 272–288. <https://doi.org/10.1071/WF09075>.
- [156] J.-H. Balbi, F.J. Chatelon, J.L. Rossi, A. Simeoni, D.X. Viegas, C. Rossa, Modelling of Eruptive Fire Occurrence and Behaviour, *J. Environ. Sci. Eng. B Former. Part J. Environ. Sci. Eng.* 3 (2014) 115–132.
- [157] A. Osmont, K. Chetehouna, N. Chaumeix, N.J. DeYonker, L. Catoire, Thermodynamic data of known volatile organic compounds (VOCs) in *Rosmarinus officinalis*: Implications for forest fire modeling, *Comput. Theor. Chem.* 1073 (2015) 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2015.09.008>.
- [158] K.L. Ebi, G. McGregor, Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts, *Environ. Health Perspect.* 116 (2008) 1449–1455. <https://doi.org/10.1289/ehp.11463>.
- [159] A. Whelton, Implications of the California Wildfires for Health, Communities, and Preparedness, National Academies Press, 2019. <https://doi.org/10.17226/25622>.

- [160] R.G. Tedeschi, L.G. Calhoun, Routes to posttraumatic growth through cognitive processing., in: D. Paton, J.M. Violanti, L.M. Smith (Eds.), *Promot. Capab. to Manag. Posttraumatic Stress Perspect. Resil.*, Thomas, Charles C., 2003: pp. 12–36. <https://psycnet.apa.org/record/2003-02891-002> (accessed September 2, 2023).
- [161] D. Wang, D. Guan, S. Zhu, M. Mac Kinnon, G. Geng, Q. Zhang, H. Zheng, T. Lei, S. Shao, P. Gong, S.J. Davis, Economic footprint of California wildfires in 2018, *Nat. Sustain.* 2020 43. 4 (2020) 252–260. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00646-7>.
- [162] A.I. Filkov, T.J. Duff, T.D. Penman, Improving fire behaviour data obtained from wildfires, *Forests.* 9 (2018) 1–21. <https://doi.org/10.3390/f9020081>.
- [163] United Nations Environment Programme, Ten impacts of the Australian bushfires, (2020). <https://www.unep.org/news-and-stories/story/ten-impacts-australian-bushfires> (accessed September 2, 2023).
- [164] C.S. Stevens-Rumann, K.B. Kemp, P.E. Higuera, B.J. Harvey, M.T. Rother, D.C. Donato, P. Morgan, T.T. Veblen, Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change, *Ecol. Lett.* 21 (2018) 243–252. <https://doi.org/10.1111/ele.12889>.
- [165] O. Hoegh-Guldberg, D. Jacob, M. Taylor, Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems Coordinating, 2018. [http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15\\_chapter3.pdf](http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_chapter3.pdf).
- [166] L’Observatoire de la Forêt Méditerranéenne, (n.d.). <https://www.ofme.org/textes.php?IDRub=18&IDS=86> (accessed October 5, 2022).
- [167] SIS 2B, Le brûlage dirigé : une technique novatrice d’aménagement du territoire ! - SIS 2B Service d’Incendie et de Secours de la Haute Corse, (n.d.). <https://sis2b.corsica/le-brulage-dirige-une-technique-novatrice-damenagement-du-territoire/> (accessed September 2, 2023).
- [168] B.W. Butler, Wildland firefighter safety zones: A review of past science and summary

- of future needs, *Int. J. Wildl. Fire.* 23 (2014) 295–308. <https://doi.org/10.1071/WF13021>.
- [169] P.-A. Bisgambiglia, J.-L. Rossi, R. Franceschini, F.-J. Chatelon, P.A. Bisgambiglia, L. Rossi, T. Marcelli, DIMZAL: A Software Tool to Compute Acceptable Safety Distance, *Open J. For.* 07 (2017) 11–33. <https://doi.org/10.4236/ojf.2017.71002>.
- [170] Indiana division of FISH & WILDLIFE, Habitat Management Fact Sheet: Prescribed Burning, 2005. [www.wildlife.in.gov](http://www.wildlife.in.gov).
- [171] W.L. McCaw, Managing forest fuels using prescribed fire - A perspective from southern Australia, *For. Ecol. Manage.* 294 (2013) 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.012>.
- [172] T.A. Waldrop, S.L. Goodrick, Introduction to Prescribed Fire in Southern Ecosystems Southern Research Station, Asheville, NC 28804, 2018.
- [173] Plans de prévention des risques naturels (PPR) - Risques d'incendies de forêt, La documentation Française, Paris, 2002.
- [174] Wildland Fire Operations Research Group, Fuelbreak effectiveness: state of the knowledge, *FPInnovations: FERIC.* (2007) 1–10. <http://wildfire.fpinnovations.ca/74/FuelBreakLiteratureSummary.pdf>.
- [175] N. Francetić, Videonadzor u Vatrogastvu, *Vatrogasni Vjesn.* (2019) 31–36.
- [176] A. Altshuler, D. Amaratunga, E. Arefyeva, M. Dolce, J. Sjastad Hagen, B. Komac, M. Migliorini, J. Mihaljevic, J. Mysiak, U. Fra Paleo, M. Pelling, J.-L. Rossi, A. Siegmund, Z. Sigmund, J. Sparf, S. Alonso Vicario, Socioeconomic and Data challenges Disaster Risk Reduction in Europe, Brussels, Belgium, 2019. <https://www.preventionweb.net/go/65182>.
- [177] A. Ganteaume, Ornamental Vegetation, *Encycl. Wildfires Wildland-Urban Interface Fires.* (2018) 1–8. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_107-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_107-1).
- [178] FAO, Fire Management: Voluntary Guidelines - Principles and strategic actions, Rome,

2006. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- [179] P.-Y. Colin, M. Jappiot, A. Mariel, C. Cabaret, F.V.S. Brocchiero, Protection des forêts contre l'incendie : fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen, FAO, 2001.
- [180] J.-L. Rossi, B. Arca, M. Salis, J.-H. Balbi, J.B. Filippi, E. Innocenti, T. Marcelli, P.-A. Santoni, Modelling the spread of wildland fire under Mediterranean conditions, 2009. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00603401>.
- [181] B.J. Stocks, T.J. Lynham, B.D. Lawson, M.E. Alexander, C.E. Van Wagner, R.S. McAlpine, D.E. Dubé, The Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview, *For. Chron.* (1989). <https://doi.org/10.5558/tfc65450-6>.
- [182] B.M. Wotton, Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications, *Environ. Ecol. Stat.* 16 (2009) 107–131. <https://doi.org/10.1007/s10651-007-0084-2>.
- [183] CNRM-ALADIN - Centre National de Recherches Météorologiques, (n.d.). <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article125> (accessed April 29, 2020).
- [184] INCA-CE, (n.d.). <http://www.inca-ce.eu/CE-Portal/> (accessed April 29, 2020).
- [185] Environment Agency, Meteorological Data for the Bilje Meteorological station, (2020).
- [186] A.L. Sullivan, Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models, *Int. J. Wildl. Fire.* 18 (2009) 349–368. <https://doi.org/10.1071/WF06144>.
- [187] A.L. Sullivan, Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models, *Int. J. Wildl. Fire.* 18 (2009) 387–403. <https://doi.org/10.1071/WF06144>.
- [188] A.L. Sullivan, Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models, *Int. J. Wildl. Fire.* 18 (2009) 369–386. <https://doi.org/10.1071/WF06144>.

- [189] J.-L. Rossi, D. Morvan, A. Simeoni, T. Marcelli, F.-J. Chatelon, Fuelbreaks: a part of wildfire prevention, in: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (Ed.), Glob. Assess. Rep. 2019, Geneva, 2019: p. 25. <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/66111>.
- [190] R.O. Weber, Modelling fire spread through fuel beds, *Prog. Energy Combust. Sci.* 17 (1991) 67–82. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(91\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0360-1285(91)90003-6).
- [191] E. Pastor, L. Zárate, E. Planas, J. Arnaldos, Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour, *Prog. Energy Combust. Sci.* 29 (2003) 139–153. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00017-0).
- [192] A.G. McArthur, Weather and grassland fire behaviour, Leaflet (A, Australia. Forestry and Timber Bureau, Canberra, 1966.
- [193] P.L.P.P. Andrews, BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System - BURN Subsystem, Part 1, Ogden, UT 84401, 1986. <http://digitalcommons.usu.edu/barkbeetles/151/>.
- [194] W. Mell, M.A. Jenkins, J. Gould, P. Cheney, A physics-based approach to modelling grassland fires, *Int. J. Wildl. Fire.* 16 (2007) 1–22. <https://doi.org/10.1071/WF06002>.
- [195] D. Morvan, J.L. Dupuy, Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation, *Combust. Flame.* 138 (2004) 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.05.001>.
- [196] D. Morvan, N. Frangieh, Wildland fires behaviour: Wind effect versus Byram's convective number and consequences upon the regime of propagation, *Int. J. Wildl. Fire.* 27 (2018) 636–641. <https://doi.org/10.1071/WF18014>.
- [197] R. Linn, J. Reisner, J.J. Colman, J. Winterkamp, Studying wildfire behavior using FIRETEC, *Int. J. Wildl. Fire.* 11 (2002) 233. <https://doi.org/10.1071/wf02007>.
- [198] A.M. Grishin, Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods of Fighting

- Them, Publishing House of the Tomsk University, Tomsk, Russia, 1996.  
<https://books.google.fr/books?id=MtScGwAACAAJ>.
- [199] J.-H. Balbi, F. Morandini, X. Silvani, J.B. Filippi, F. Rinieri, A physical model for wildland fires, *Combust. Flame.* 156 (2009) 2217–2230.  
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.07.010>.
- [200] F.J. Chatelon, J.H. Balbi, D. Morvan, J.L. Rossi, T. Marcelli, A convective model for laboratory fires with well-ordered vertically-oriented fuel beds, *Fire Saf. J.* 90 (2017) 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.022>.
- [201] J.-H. Balbi, J.-L. Rossi, T. Marcelli, F.-J. Chatelon, Physical Modeling of Surface Fire Under Nonparallel Wind and Slope Conditions, *Combust. Sci. Technol.* 182 (2010) 922–939. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00102200903485178>.
- [202] J.-H. Balbi, F.-J. Chatelon, J.-L. Rossi, T. Marcelli, How 10 years of physical assumptions led to the development of the Balbi model, from laboratory scale to field scale, in: *Fire Contin. Conf. – Prep. Futur. Wildl. Fire*, Missoula, MT, 2018.
- [203] J.-H. Balbi, J.-L. Rossi, T. Marcelli, P.-A. Santoni, A 3D Physical Real-Time Model of Surface Fires Across Fuel Beds, *Combust. Sci. Technol.* 179 (2007) 2511–2537.  
<http://dx.doi.org/10.1080/00102200701484449>  
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00102200701484449>.
- [204] J.H. Balbi, F.J. Chatelon, D. Morvan, J.L. Rossi, T. Marcelli, F. Morandini, A convective–radiative propagation model for wildland fires, *Int. J. Wildl. Fire.* 29 (2020) 723–738. <https://doi.org/10.1071/WF19103>.
- [205] F.J. Chatelon, J.H. Balbi, M.G. Cruz, D. Morvan, J.L. Rossi, C. Awad, N. Frangieh, J. Fayad, T. Marcelli, Extension of the Balbi fire spread model to include the field scale conditions of shrubland fires, *Int. J. Wildl. Fire.* (2022).  
<https://doi.org/10.1071/WF21082>.

- [206] P.J. Pagni, T.G. Peterson, Flame spread through porous fuels, *Symp. Combust.* 14 (1973) 1099–1107. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(73\)80099-2](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(73)80099-2).
- [207] M.A. Lefsky, W.B. Cohen, S.A. Acker, G.G. Parker, T.A. Spies, D. Harding, Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests, *Remote Sens. Environ.* 70 (1999) 339–361. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00052-8).
- [208] D. V. Sandberg, R.D. Ottmar, G.H. Cushon, Characterizing fuels in the 21st Century, *Int. J. Wildl. Fire.* (2001). <https://doi.org/10.1071/wf01036>.
- [209] N.D. Burrows, Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles, *Int. J. Wildl. Fire.* 10 (2001) 137–143. <https://doi.org/10.1071/WF01005>.
- [210] M. Cohen, E. Rigolot, J.C. Valette, From the vegetation to the inputs of a fire model: fuel modelling for wildland-urban interface management. , *Warm Int. Work. “Forest Fires Wildland-Urban Interface Rural Areas Eur. an Integr. Plan. Manag. Challenge.”* (2004) 113–120.
- [211] C. Awad, D. Morvan, J.-L. Rossi, T. Marcelli, F.J. Chatelon, F. Morandini, J.-H. Balbi, Fuel moisture content threshold leading to fire extinction under marginal conditions, *Fire Saf. J.* 118 (2020) 11. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103226>.
- [212] J. Fayad, L. Rossi, N. Frangieh, C. Awad, G. Accary, F.-J. Chatelon, F. Morandini, T. Marcelli, V. Cancellieri, D. Cancellieri, D. Morvan, A. Pieri, G. Planelles, R. Costantini, S. Meradji, J.-L. Rossi, Numerical study of an experimental high-intensity prescribed fire across Corsican *Genista salzmannii* vegetation, *Fire Saf. J.* (2022) 103600. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2022.103600>.
- [213] S. Paolucci, On the Filtering of Sound from the Navier–Stokes Equations, *Rev. Mex. Física.* 37 (1982) 53.
- [214] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, The Chemkin Thermodynamic Data Base,

Livermore, CA (USA), 1990.

- [215] B.F. Magnussen, B.H. Hjertager, On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, in: *Symp. Combust.*, Cambridge, Massachusetts, 1977: pp. 719–729. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4).
- [216] G. Cox, *Combustion fundamentals of fire*, Academic Press, London, 1995.
- [217] S.A. Orszag, Introduction to renormalization group modeling of turbulence, in: *Simul. Model. Turbul. Flows*, Oxford University Press, Inc., New York, 1996.
- [218] V. Yakhot, S.A. Orszag, S. Thangam, T.B. Gatski, C.G. Speziale, Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Phys. Fluids A*. 4 (1992) 1510–1520. <https://doi.org/10.1063/1.858424>.
- [219] N. Frangieh, D. Morvan, S. Meradji, G. Accary, O. Bessonov, Numerical simulation of grassland fires behavior using an implicit physical multiphase model, *Fire Saf. J.* 102 (2018) 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.06.004>.
- [220] D. Morvan, S. Meradji, G. Accary, Wildfire behavior study in a mediterranean pine stand using a physically based model, *Combust. Sci. Technol.* 180 (2008) 230–248. <https://doi.org/10.1080/00102200701600978>.
- [221] J.L. Dupuy, D. Morvan, Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model, *Int. J. Wildl. Fire.* 14 (2005) 141–151. <https://doi.org/10.1071/WF04028>.
- [222] N. Frangieh, G. Accary, J.-L. Rossi, D. Morvan, S. Meradji, T. Marcelli, F.-J. Chatelon, Fuelbreak effectiveness against wind-driven and plume-dominated fires: a 3D numerical study, *Fire Saf. J.* 124 (2021) 103383. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103383>.
- [223] R.R. Linn, J.M. Canfield, P. Cunningham, C. Edminster, J.L. Dupuy, F. Pimont, Using periodic line fires to gain a new perspective on multi-dimensional aspects of forward fire

- spread, *Agric. For. Meteorol.* 157 (2012) 60–76.  
<https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2012.01.014>.
- [224] C. Awad, N. Frangieh, T. Marcelli, G. Accary, D. Morvan, S. Meradji, F.-J. Chatelon, J.-L. Rossi, Numerical study of the moisture content threshold under prescribed burning conditions, *Fire Saf. J.* 122 (2021) In Press.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103324>.
- [225] D.D. Evans, H.W. Emmons, Combustion of wood charcoal, *Fire Res.* 1 (1977) 57–66.
- [226] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 1996.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.022>.
- [227] A. Favre, L.S.G. Kuvshinov, R. Dumas, J. Gaviglio, M. Coantic, *La turbulence en mécanique des fluides : bases théoriques et expérimentales, méthodes statistiques*, Gauthier-Villars, 1977.
- [228] Y. Horibata, Numerical simulation of a low mach number flow with a large temperature variation, *Comput. Fluids.* 21 (1992) 185–200.  
<https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>.
- [229] W.E. Cascio, Wildland fire smoke and human health, *Sci. Total Environ.* 624 (2018) 586–595. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.086>.
- [230] G.G. Katul, L. Mahrt, D. Poggi, C. Sanz, One- and two-equation models for canopy turbulence, *Boundary-Layer Meteorol.* 113 (2004) 81–109.  
<https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000037333.48760.e5>.
- [231] T. Watanabe, Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies, *Boundary-Layer Meteorol.* 112 (2004) 307–341.  
<https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000027912.84492.54>.
- [232] Z.Q. Li, F. Wei, Y. Jin, Numerical simulation of pulverized coal combustion and NO formation, *Chem. Eng. Sci.* 58 (2003) 5161–5171.

- <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.08.012>.
- [233] C.R. Kaplan, S.W. Baek, E.S. Oran, J.L. Ellzey, Dynamics of a strongly radiating unsteady ethylene jet diffusion flame, *Combust. Flame.* 96 (1994) 1–21. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)90154-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)90154-6).
- [234] K.J. Syed, C.D. Stewart, J.B. Moss, Modelling soot formation and thermal radiation in buoyant turbulent diffusion flames, in: *Symp. Combust.*, 1991: pp. 1533–1541. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80423-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80423-6).
- [235] J.B. Moss, *Turbulent Diffusion Flames*, Academic Press, London, UK, 1990.
- [236] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, *An Introduction to Parallel Computational Fluid Dynamics*, 2nd ed., 2007. <https://doi.org/10.1109/mcc.1998.736434>.
- [237] P.J. Coelho, Numerical simulation of the interaction between turbulence and radiation in reactive flows, *Prog. Energy Combust. Sci.* 33 (2007) 311–383. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.11.002>.
- [238] K. Hanjalić, S. Kenjereš, F. Durst, Natural convection in partitioned two-dimensional enclosures at higher Rayleigh numbers, *Int. J. Heat Mass Transf.* 39 (1996) 1407–1427. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00219-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00219-7).
- [239] P.M. Gresho, R.L. Lee, R.L. Sani, P.M. Gresho, R.L. Lee, R.L. Sani, On the time-dependent solution of the incompressible Navier-Stokes equations in two and three dimensions, *Ranm.* 1 (1980) 27–79. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980ranm.book...27G/abstract> (accessed September 2, 2023).
- [240] B.P. Leonard, A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 19 (1979) 59–98. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90034-3).
- [241] T. Hayase, J.A.C. Humphrey, R. Greif, A consistently formulated QUICK scheme for

- fast and stable convergence using finite-volume iterative calculation procedures, *J. Comput. Phys.* 98 (1992) 108–118. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90177-Z](https://doi.org/10.1016/0021-9991(92)90177-Z).
- [242] M.F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, Third, Academic Press, 2013. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-65874-3>.
- [243] R. Barrett, M. Berry, T.F. Chan, J. Demmel, J.M. Donato, J. Dongarra, V. Eijkhout, R. Pozo, C. Romine, H. Van der Vorst, *Templates for the solution of linear systems: building blocks for iterative methods*, 2nd ed., Siam, Philadelphia, 1994. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2300-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2300-9_7).
- [244] P.L. Andrews, *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System - BURN Subsystem*, Part 1, Ogden, UT 84401, 1986.
- [245] M.A. Finney, J.D. Cohen, J.M. Forthofer, S.S. McAllister, M.J. Gollner, D.J. Gorham, K. Saito, N.K. Akafuah, B.A. Adam, J.D. English, Role of buoyant flame dynamics in wildfire spread, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112 (2015) 9833–9838. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504498112>.
- [246] N.J. De Mestre, E.A. Catchpole, D.H. Anderson, R.C. Rothermel, Uniform Propagation of a Planar Fire front Without Wind, *Combust. Sci. Technol.* 65 (1989) 231–2444. <https://doi.org/10.1080/00102208908924051>.
- [247] W.R. Catchpole, E.A. Catchpole, B.W. Butler, R.C. Rothermel, D.J. Latham, Rate of Spread of Free-Burning Fires in Woody Fuels in a Wind Tunnel, *Combust. Sci. Technol.* 131 (1998) 1–37. <https://doi.org/10.1080/00102209808935753>.
- [248] W.R. Anderson, M.G. Cruz, P.M. Fernandes, L. McCaw, J.A. Vega, R.A. Bradstock, L. Fogarty, J. Gould, G. McCarthy, J.B. Marsden-Smedley, S. Matthews, G. Mattingley, H.G. Pearce, B.W. Van Wilgen, A generic, empirical-based model for predicting rate of fire spread in shrublands, *Int. J. Wildl. Fire.* 24 (2015) 443–460. <https://doi.org/10.1071/WF14130>.

- [249] W.R. Anderson, E.A. Catchpole, B.W. Butler, Convective heat transfer in fire spread through fine fuel beds, *Int. J. Wildl. Fire.* 19 (2010) 284–298. <https://doi.org/10.1071/WF09021>.
- [250] H.E. Anderson, Heat transfer and fire spread, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper INT-69, 1969.
- [251] W.L. Fons, Analysis of fire spread in light forest fuels, *J. Agric. Res.* 72 (1946) 93–121.
- [252] W.R. Catchpole, E.A. Catchpole, A.G. Tate, B. Butler, R.C. Rothermel, A model for the steady spread of fire through a homogeneous fuel bed, in: *IV Int. Conf. For. Fire Res. 2002*, Wildl. Fire Saf. Summit, Luso, Coimbra, Portugal, 2002.
- [253] M.F. Wolff, G.F. Carrier, F.E. Fendell, M.F. Wolff, G.F. Carrier, F.E. Fendell, Wind-Aided Firespread across Arrays of Discrete Fuel Elements. I. Theory, *Combust. Sci. Technol.* 77 (1991) 261–289. <https://doi.org/10.1080/00102209108951731>.
- [254] C.G. Rossa, P.M. Fernandes, Empirical modeling of fire spread rate in no-wind and no-slope conditions, *For. Sci.* 64 (2018) 358–370. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxy002>.
- [255] J.B. Fang, An investigation of the effect of controlled wind on the rate of fire spread, Department of Chemical Engineering, Fredericton, Canada, University of New Brunswick, 1969.
- [256] R.A. Wilson, Observations of Extinction and Marginal Burning States in Free Burning Porous Fuel Beds, *Combust. Sci. Technol.* 44 (1985) 179–193. <https://doi.org/10.1080/00102208508960302>.
- [257] N. Liu, J. Wu, H. Chen, L. Zhang, Z. Deng, K. Satoh, D.X. Viegas, J.R. Raposo, Upslope spread of a linear flame front over a pine needle fuel bed: The role of convection cooling, *Proc. Combust. Inst.* 35 (2015) 2691–2698. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.05.100>.
- [258] N.P. Cheney, J.S. Gould, W.R. Catchpole, The Influence Of Fuel, Weather And Fire Shape Variables On Fire-Spread In Grasslands, *Int. J. Wildl. Fire.* 3 (1993) 31–44.

<https://doi.org/10.1071/WF9930031>.

- [259] C.G. Rossa, The effect of fuel moisture content on the spread rate of forest fires in the absence of wind or slope, *Int. J. Wildl. Fire.* 26 (2017) 24–31. <https://doi.org/10.1071/WF16049>.
- [260] R.S. Mcalpine, G. Xanthopoulos, Predicted vs Observed Fire Spread Rates in Ponderosa Pine Fuel Beds: A Test of American and Canadian Systems, in: 10th Conf. Fire For. Meteorol., Ottawa, Canada, 1989: pp. 287–295.
- [261] H.W. Emmons, T. Shen, Fire spread in paper arrays, *Symp. Combust.* 13 (1971) 917–926. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80092-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80092-9).
- [262] M.A. Finney, J. Forthofer, I.C. Grenfell, B.A. Adam, N.K. Akafuah, K. Saito, A study of flame spread in engineered cardboard fuelbeds: Part I: Correlations and observations, in: *Proc. Seventh Int. Symp. Scale Model.*, Hirosaki, Japan, 2013.
- [263] E. Bilgili, B. Saglam, Fire behavior in maquis fuels in Turkey, *For. Ecol. Manage.* 184 (2003) 201–207. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00208-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00208-1).
- [264] J. Antonio Vega, P. Fernandes, P. Cuiñas, M.T. Fontúrbel, J.R. Pérez, C. Loureiro, Fire spread analysis of early summer field experiments in shrubland fuel types of northwestern Iberia, *For. Ecol. Manage.* 234S (2006). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.138>.
- [265] F. Morandini, X. Silvani, L. Rossi, P.A. Santoni, A. Simeoni, J.-H. Balbi, J.-L. Rossi, T. Marcelli, Fire spread experiment across Mediterranean shrub: Influence of wind on flame front properties, *Fire Saf. J.* 41 (2006) 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.01.006>.
- [266] X. Silvani, F. Morandini, Fire spread experiments in the field: Temperature and heat fluxes measurements, *Fire Saf. J.* 44 (2009) 279–285. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2008.06.004>.

- [267] P.A. Santoni, A. Simeoni, J.L. Rossi, F. Bosseur, F. Morandini, X. Silvani, J.H. Balbi, D. Cancellieri, L. Rossi, Instrumentation of wildland fire: Characterisation of a fire spreading through a Mediterranean shrub, *Fire Saf. J.* 41 (2006) 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.11.010>.
- [268] B. Butler, C. Teske, D. Jimenez, J. O'Brien, P. Sopko, C. Wold, M. Vosburgh, B. Hornsby, E. Loudermilk, Observations of energy transport and rate of spreads from low-intensity fires in longleaf pine habitat - RxCADRE 2012, *Int. J. Wildl. Fire.* 25 (2016) 76–89. <https://doi.org/10.1071/WF14154>.
- [269] E. V. Mueller, N. Skowronski, J.C. Thomas, K. Clark, M.R. Gallagher, R. Hadden, W. Mell, A. Simeoni, Local measurements of wildland fire dynamics in a field-scale experiment, *Combust. Flame.* 194 (2018) 452–463. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.05.028>.
- [270] M.S. Owen, 2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2009.
- [271] F. Hamann, S. Balzer, Y. Pons, En Corse, une filière bois peu développée, *Insee Anal.* (2016). <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2019604>.
- [272] M. Reille, J. Gamisans, J.L. De Beaulieu, V. Andrieu, The late-glacial at Lac de Creno (Corsica, France): A key site in the western Mediterranean basin, *New Phytol.* 135 (1997) 547–559. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00683.x>.
- [273] M. Reille, J. Gamisans, V. Andrieu-Ponel, J.L. De Beaulieu, The Holocene at Lac de Creno, Corsica, France: A key site for the whole island, *New Phytol.* 141 (1999) 291–307. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00343.x>.
- [274] M. Lestienne, B. Vanni re, I. Jouffroy-Bapicot, Integrating past variability in climate-driven Mediterranean fire hazard assessments for 2020-2100, *Clim. Change.* (2021). <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-164555/V1>.

- [275] Le brûlage dirigé : une technique novatrice d'aménagement du territoire!, (n.d.). [http://www.sdis2b.fr/Le-brulage-dirige-une-technique-novatrice-d-amenagement-du-territoire-\\_a425.html](http://www.sdis2b.fr/Le-brulage-dirige-une-technique-novatrice-d-amenagement-du-territoire-_a425.html) (accessed May 10, 2020).
- [276] N. Frangieh, G. Accary, J.-L. Rossi, D. Morvan, F.-J. Chatelon, T. Marcelli, S. Meradji, L. Rossi, C. Awad, J. Fayad, P. Briot, Fuelbreaks design: from CFD modelling to operational tools, in: D.X. Viegas, L.M. Ribeiro (Eds.), *Adv. For. Fire Res. 2022*, Coimbra, Portugal, 2022: pp. 222–226. [https://doi.org/10.14195/978-989-26-2298-9\\_36](https://doi.org/10.14195/978-989-26-2298-9_36).
- [277] TF1 INFO, Incendies en Europe : l'effroyable bilan de l'année 2022, (n.d.). <https://www.tf1info.fr/environnement-ecologie/incendie-et-feux-de-foret-en-europe-le-bilan-effroyable-de-l-annee-2022-selon-les-donnees-satellites-copernicus-2241774.html> (accessed September 2, 2023).
- [278] Ro. Imbach, M. Romain, P. Breteau, Incendies : six cartes et graphiques qui dressent un premier bilan d'un été sans précédent, *Le Monde*,. (2022). [https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2022/08/22/incendies-six-cartes-et-graphiques-qui-montrent-un-premier-bilan-inedit-de-l-ete\\_6138700\\_4355770.html](https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2022/08/22/incendies-six-cartes-et-graphiques-qui-montrent-un-premier-bilan-inedit-de-l-ete_6138700_4355770.html) (accessed September 2, 2023).
- [279] Euronews, Espagne : 2022, année la plus chaude enregistrée, (n.d.). <https://fr.euronews.com/2023/01/02/espagne-2022-annee-la-plus-chaude-enregistree> (accessed September 13, 2023).
- [280] T. Marcelli, L. Rossi, G. Accary, C. Awad, A. Burglin, D. Cancellieri, V. Cancellieri, F.-J. Chatelon, J. Fayad, L. Ferrat, N. Frangieh, H. Grossi, S. Méradji, F. Morandini, D. Morvan, A. Pieri, C. Wandon, A. Arobase.fr, J.-L. Rossi, GOLIAT, a project to develop tools for firefighting and land use planning, in: D.X. Viegas, L.M. Ribeiro (Eds.), *Adv. For. Fire Res. 2022*, Coimbra, Portugal, 2022: pp. 234–239. [https://doi.org/10.14195/978-989-26-2298-9\\_38](https://doi.org/10.14195/978-989-26-2298-9_38).
- [281] V. Leroy-Cancellieri, P. Augustin, J.B. Filippi, C. Mari, M. Fourmentin, F. Bosseur, F.

- Morandini, H. Delbarre, Evaluation of wildland fire smoke plume dynamics and aerosol load using UV scanning lidar and fire-atmosphere modelling during the Mediterranean Letia 2010 experiment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14 (2014) 509–523. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-509-2014>.
- [282] D. Morvan, S. Meradji, W. Mell, Interaction between head fire and backfire in grasslands, *Fire Saf. J.* 58 (2013) 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.01.027>.
- [283] G.M. Byram, Forest fire behaviour, in: K.P. Davis (Ed.), *For. Fire Control Use*, McGraw-Hill, New York, NY, 1959: pp. 90–123.
- [284] G.M. Byram, Combustion of forest fuels, in: K.P. Davis (Ed.), *For. Fire Control Use*, McGraw-Hill, New York, NY, 1959: pp. 155–182.
- [285] N. Frangieh, G. Accary, D. Morvan, S. M eradji, O. Bessonov, Wildfires front dynamics: 3D structures and intensity at small and large scales, *Combust. Flame.* 211 (2020) 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.017>.
- [286] D.X. Viegas, *Advances in forest fire research*, *Adv. For. Fire Res.* (2014). <https://doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6>.
- [287] X. S anchez-Monroy, W. Mell, J. Torres-Arenas, B.W. Butler, Fire spread upslope: Numerical simulation of laboratory experiments, *Fire Saf. J.* 108 (2019) 13. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102844>.
- [288] Forestry Canada Fire Danger Group, *Development of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*, Ottawa, 1992. [https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=10068%0Ahttps://www.frames.gov/documents/catalog/forestry\\_canada\\_fire\\_danger\\_group\\_1992.pdf](https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=10068%0Ahttps://www.frames.gov/documents/catalog/forestry_canada_fire_danger_group_1992.pdf).
- [289] D.X. Viegas, Slope and wind effects on fire propagation, *Int. J. Wildl. Fire.* 13 (2004) 143–156. <https://doi.org/10.1071/WF03046>.
- [290] J.E. Keeley, Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested

- usage, *Int. J. Wildl. Fire.* 18 (2009) 116–126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>.
- [291] M.E. Alexander, M.G. Cruz, Fireline Intensity, *Encycl. Wildfires Wildland-Urban Interface Fires.* (2020) 453–460. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_52).
- [292] A. Dahale, S. Ferguson, B. Shotorban, S. Mahalingam, Effects of distribution of bulk density and moisture content on shrub fires, *Int. J. Wildl. Fire.* 22 (2013) 625–641. <https://doi.org/10.1071/wf12040>.
- [293] J.K. Burrows, Experimental development of a fire management model for jarrah (*Eucalyptus marginata* ex Sm) forest, Australian National University, Canberra, 1994.
- [294] L. Zárate, J. Arnaldos, J. Casal, Establishing safety distances for wildland fires, *Fire Saf. J.* 43 (2008) 565–575. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.01.001>.
- [295] J. Fayad, G. Accary, F. Morandini, F.-J. Chatelon, L. Rossi, T. Marcelli, D. Cancellieri, V. Cancellieri, Y. Rahib, D. Morvan, S. Meradji, A. Pieri, J.-Y. Duret, J.-L. Rossi, Numerical Assessment of Safe Separation Distance in the Wildland Urban Interfaces, *Fire.* 6 (2023) 209. <https://doi.org/10.3390/FIRE6050209>.
- [296] J.-L. Rossi, J. Fayad, F.-J. Chatelon, T. Marcelli, S. Meradji, D. Cancellieri, Y. Rahib, G. Accary, D. Morvan, L. Rossi, P. Briot, A. Pieri, F. Morandini, Separation safety distances in wildland urban interfaces, in: *Int. Conf. Mater. Energy, Caserta, Italy, 2023*.
- [297] J.-L. Rossi, K. Chetehouna, A. Collin, B. Moretti, J.-H. Balbi, Simplified Flame Models and Prediction of the Thermal Radiation Emitted by a Flame Front in an Outdoor Fire, *Combust. Sci. Technol.* 182 (2010) 1457–1477. <https://doi.org/10.1080/00102202.2010.489914>.
- [298] W.G. Page, B.W. Butler, An empirically based approach to defining wildland firefighter safety and survival zone separation distances, *Int. J. Wildl. Fire.* 26 (2017) 655–667. <https://doi.org/10.1071/WF16213>.
- [299] R.M. Nelson, B.W. Butler, D.R. Weise, Entrainment regimes and flame characteristics

- of wildland fires, *Int. J. Wildl. Fire.* 21 (2012) 127–140.  
<https://doi.org/10.1071/WF10034>.
- [300] B.M. Wotton, J.S. Gould, W.L. McCaw, N.P. Cheney, S.W. Taylor, Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest, *Int. J. Wildl. Fire.* 21 (2012) 270–281.  
<https://doi.org/10.1071/WF10127>.
- [301] R.M. Nelson, An effective wind speed for models of fire spread, *Int. J. Wildl. Fire.* 11 (2002) 153–161. <https://doi.org/10.1071/WF02031>.
- [302] R.R. Linn, P. Cunningham, Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: Basic fire behavior and dependence on wind speed, *J. Geophys. Res. Atmos.* 110 (2005) 1–19. <https://doi.org/10.1029/2004JD005597>.
- [303] M.G. Cruz, J.S. Gould, M.E. Alexander, A.L. Sullivan, W. Lachlan McCaw, S. Matthews, *A Guide to Rate of Fire Spread Models for Australian Vegetation*, CSIRO Land and Water, Canberra, ACT, and AFAC, Melbourne, Vic, 2015.
- [304] S. Vaiciulyte, E.R. Galea, A. Veeraswamy, L.M. Hulse, Island vulnerability and resilience to wildfires: A case study of Corsica, *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 40 (2019) 101272. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101272>.
- [305] F. Mouillot, J.P. Ratte, R. Joffre, D. Mouillot, S. Rambal, Long-term forest dynamic after land abandonment in a fire prone Mediterranean landscape (central Corsica, France), *Landsc. Ecol.* 20 (2005) 101–112. <https://doi.org/10.1007/s10980-004-1297-5>.
- [306] V. Pasqualini, P. Oberti, S. Vigetta, O. Riffard, C. Panaïotis, M. Cannac, L. Ferrat, A GIS-based multicriteria evaluation for aiding risk management *Pinus pinaster* Ait. Forests: A case study in Corsican island, western Mediterranean region, *Environ. Manage.* 48 (2011) 38–56. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9674-8>.
- [307] D. Morvan, S. Meradji, W. Mell, Interaction between head fire and backfire in grasslands, *Fire Saf. J.* 58 (2013) 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.01.027>.

- [308] N. Frangieh, *Physique et modélisation du comportement des feux de forêts*, Aix-Marseille, 2019. <http://www.theses.fr/2019AIXM0220> (accessed October 29, 2020).
- [309] W.R. Catchpole, R.A. Bradstock, J. Choate, L.G. Fogarty, N. Gellie, G. McCarthy, W.L. McCaw, J.B. Marsden-Smedley, G. Pearce, Cooperative development of equations for heathland fire behaviour, in: D.X. Viegas (Ed.), *Proc. 3rd Int. Conf. For. Fire Res. 14th Conf. Fire For. Meteorol.*, Luso, Coimbra, Portugal, 1998: pp. 16–20.
- [310] M.G. Cruz, M.E. Alexander, The 10% wind speed rule of thumb for estimating a wildfire's forward rate of spread in forests and shrublands, *Ann. For. Sci.* 76 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0829-8>.
- [311] M.G. Cruz, M.E. Alexander, P.M. Fernandes, M. Kilinc, Â. Sil, Evaluating the 10% wind speed rule of thumb for estimating a wildfire's forward rate of spread against an extensive independent set of observations, *Environ. Model. Softw.* 133 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104818>.
- [312] S. Sauvagnargues-Lesage, G. Dusserre, F. Robert, G. Dray, D.W. Pearson, Experimental validation in Mediterranean shrub fuels of seven wildland fire rate of spread models, *Int. J. Wildl. Fire.* 10 (2001) 15–22. <https://doi.org/10.1071/WF01006>.
- [313] A.C. Pepin, M. Wotton, Fire behaviour observation in shrublands in nova scotia, canada and assessment of aids to operational fire behaviour prediction, *Fire.* 3 (2020) 1–22. <https://doi.org/10.3390/fire3030034>.
- [314] G.M. Byram, Combustion of forest fuels, in: K.P. Davis (Ed.), *For. Fire Control Use*, McFraw-Hill, New York, NY, 1959: pp. 155–182.
- [315] B.W. Butler, M. a Finney, P.L. Andrews, F. a Albini, A radiation-driven model for crown fire spread, *Can. J. For. Res.* 34 (2004) 1588–1599. <https://doi.org/10.1139/x04-074>.
- [316] N.P. Cheney, J.S. Gould, W.R. Catchpole, Prediction of fire spread in grasslands, *Int. J. Wildl. Fire.* 8 (1998) 1–13. <https://doi.org/10.1071/WF9980001>.

- [317] R.G. Clark, Threshold requirements for fire spread in grassland fuels, Texas Tech. University, Lubbock, 1983.
- [318] P.M. Fernandes, H.S. Botelho, F.C. Rego, C. Loureiro, Empirical modelling of surface fire behaviour in maritime pine stands, *Int. J. Wildl. Fire.* 18 (2009) 698–710. <https://doi.org/10.1071/WF08023>.
- [319] P.M. Fernandes, W.R. Catchpole, F.C. Rego, Shrubland fire behaviour modelling with microplot data, *Can. J. For. Res. Can. Rech. For.* 30 (2000) 889–899. <https://doi.org/DOI10.1139/cjfr-30-6-889>.
- [320] R.M. Nelson Jr., Flame characteristics for fires in southern fuels, USDA Forest Service, General Research Paper SE-205. Southeast Forest Experimental Station, Asheville, NC, USA, 1980.
- [321] R.M. Nelson Jr., C.W. Adkins, Flame characteristics of wind-driven surface fires, *Can. J. For. Res.* 16 (1986) 1293–1300. <https://doi.org/10.1139/x86-229>.
- [322] B.W. van Wilgen, D.C. Le Maitre, F.J. Kruger, Fire behaviour in South African fynbos(macchia) vegetation and predictions from Rothermel’s fire model., *J. Appl. Ecol.* 22 (1985) 207–216. <https://doi.org/10.2307/2403338>.
- [323] J.A. Vega, P. Cuinas, T. Fonturbel, P. Perez-Gorostiaga, C. Fernandez, Predicting fire behavior in Galician (NW Spain) shrubland fuel complexes, in: D.X. Viegas (Ed.), 3rd Int. Conf. For. Fire Res. 14th Conf. Fire For. Meteorol., ADAI, University of Coimbra, Luso-Coimbra, Portugal, 1998: pp. 713–728.
- [324] D. Morvan, A numerical study of flame geometry and potential for crown fire initiation for a wildfire propagating through shrub fuel, *Int. J. Wildl. Fire.* 16 (2007) 511–518. <https://doi.org/10.1071/WF06010>.
- [325] F.A. Albin, A model for the wind-blown flame from a line fire, *Combust. Flame.* 43 (1981) 155–174. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(81\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(81)90014-6).

- [326] D.R. Weise, G.S. Biging, Effects of wind velocity and slope on flame properties, *Can. J. For. Res.* 26 (1996) 1849–1858. <https://doi.org/10.1139/x26-210>.
- [327] R.M. Nelson, Re-analysis of wind and slope effects on flame characteristics of Mediterranean shrub fires, *Int. J. Wildl. Fire.* 24 (2015) 1001–1007.
- [328] G.J. Cary, R.E. Keane, R.H. Gardner, S. Lavorel, M.D. Flannigan, I.D. Davies, C. Li, J.M. Lenihan, T.S. Rupp, F. Mouillot, Comparison of the sensitivity of landscape-fire-succession models to variation in terrain, fuel pattern, climate and weather, *Landsc. Ecol.* 21 (2006) 121–137. <https://doi.org/10.1007/s10980-005-7302-9>.
- [329] N. Liu, J. Wu, H. Chen, X. Xie, L. Zhang, B. Yao, J. Zhu, Y. Shan, Effect of slope on spread of a linear flame front over a pine needle fuel bed : experiments and modelling, *Int. J. Wildl. Fire.* 23 (2014) 1087–1096. <https://doi.org/10.1071/WF12189>.
- [330] A.G. McArthur, N.P. Cheney, The characterization of fires in relation to ecological studies, with an introduction by Neil Burros, *Fire Ecol.* 11 (2015). <https://doi.org/10.1007/BF03400629>.
- [331] C. Butler, The urban/wildland fire interface, *Proc. West. States Sect. Inst. Pap.* 74 (1974) 1–17.
- [332] M. Jappiot, J.R. González-Olabarria, C. Lampin-Maillet, L. Borgniet, Assessing wildfire risk in time and space, in: Y. Birot (Ed.), *Living with Wildfires What Sci. Can Tell Us? A Contrib. to Sci. Dialogue*, European Forest Institute, Mediterranean regional office - EFIMED, Joensuu, Finland, 2009: pp. 41–48.
- [333] V.C. Radeloff, R.B. Hammer, S.I. Stewart, J.S. Fried, S.S. Holcomb, J.F. Mckeefry, The Wildland–Urban Interface in the United States, *Commun. Ecol. Appl.* 15 (2005) 799–805. <https://doi.org/10.1890/04-1413>.
- [334] J.B. Davis, The Wildland-Urban Interface: Paradise or Battleground?, *J. For.* 88 (1990) 26–31. <https://doi.org/10.1093/jof/88.1.26>.

- [335] J.P. Argañaraz, V.C. Radeloff, A. Bar-Massada, G.I. Gavier-Pizarro, C.M. Scavuzzo, L.M. Bellis, Assessing wildfire exposure in the Wildland-Urban Interface area of the mountains of central Argentina, *J. Environ. Manage.* 196 (2017) 499–510. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.058>.
- [336] M. Buxton, R. Haynes, D. Mercer, A. Butt, Vulnerability to Bushfire Risk at Melbourne’s Urban Fringe: The Failure of Regulatory Land Use Planning, *Geogr. Res.* 49 (2011) 1–12. <https://doi.org/10.1111/j.1745-5871.2010.00670.x>.
- [337] B.W. van Wilgen, G.G. Forsyth, P. Prins, The management of fire-adapted ecosystems in an urban setting: The case of table mountain National Park, South Africa, *Ecol. Soc.* 17 (2012). <https://doi.org/10.5751/ES-04526-170108>.
- [338] V.C. Radeloff, D.P. Helmers, H. Anu Kramer, M.H. Mockrin, P.M. Alexandre, A. Bar-Massada, V. Butsic, T.J. Hawbaker, S. Martinuzzi, A.D. Syphard, S.I. Stewart, Rapid growth of the US wildland-urban interface raises wildfire risk, in: *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2018: pp. 3314–3319. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718850115>.
- [339] US Fire Administration, *Wildland Urban Interface: A Look at Issues and Resolutions A Report of Recommendations for Elected Officials, Policymakers and All Levels of Government, Tribal and Response Agencies*, 2022.
- [340] J.M. Moreno, A. Vázquez, R. Vélez, Recent history of forest fires in Spain, in: J.M. Moreno (Ed.), *Large For. Fires*, Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 1998: pp. 159–185. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1999.462-1.x>.
- [341] S.H. Doerr, C. Santin, What links Portugal ’ s deadliest wildfre to Grenfell Tower ? Economics and neglect, *Conversat.* (2017). [https://theconversation.com/what-links-portugals-deadliest-wildfir...ics-and-neglect-79815?utm\\_source=twitter&utm\\_medium=twitterbutton](https://theconversation.com/what-links-portugals-deadliest-wildfir...ics-and-neglect-79815?utm_source=twitter&utm_medium=twitterbutton).
- [342] A. Bento-Gonçalves, A. Vieira, L. Da Vinha, S. Hamada, Changes in mainland

- Portuguese forest areas since the last decade of the XXth century, *Mediterranee*. (2018).  
<https://doi.org/10.4000/MEDITERRANEE.10025>.
- [343] F. Chappaz, A. Ganteaume, Role of land-cover and WUI types on spatio-temporal dynamics of fires in the French Mediterranean area, *Risk Anal.* 43 (2023) 1032–1057.  
<https://doi.org/10.1111/risa.13979>.
- [344] D. Morge, F. Guerra, M. Jappiot, Amélioration et application de la méthode de cartographie des interfaces habitat-forêt sur le département de Haute-Corse dans le cadre de la prévention du risque d’incendie de forêt Rapport, 2014.
- [345] USDA Forest Service, The Safe Separation Distance Evaluator : Is My Safety Zone Big, *Rocky Mt. Res. Stn.* 5 (2023).  
<https://www.fs.usda.gov/research/rmrs/products/sycu/safe-separation-distance-evaluator-my-safety-zone-big-enough>.
- [346] Débroussailllements obligatoires - Le syndicat mixte forestier, un outil pour les communes et les forêts du Vaucluse, (2018).  
<https://www.syndicatmixteforestier.com/travaux-forestiers/débroussailllements-obligatoires/> (accessed November 21, 2023).
- [347] B.W. Butler, J.D. Cohen, FIREFIGHTER SAFETY ZONES : How BIG Is BIG ENOUGH ?, *Fire Manag. Notes.* 58 (1998) 13–16.
- [348] L.R. Green, H.E. Schimke, Guides for fuel-breaks in Sierra Nevada mixed-conifer type, 1971.
- [349] B.W. Butler, R.A. Parsons, W. Mell, Recent findings relating to firefighter safety zones, *Proc. Large Wildl. Fires Conf.* (2015) 30–34.
- [350] M. Oguro, E. Arens, R. de Dear, H. Zhang, T. Katayama, Convective heat transfer coefficients and clothing insulations for parts of the clothed human body under airflow conditions, *J. Archit. Plan. Environ. Eng.* 561 (2002) 21–29.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00003-1>.

- [351] M. Yazdani, J.H. Klems, Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings, *ASHRAE Trans.* 100 (1994) 17.
- [352] R. Cai, N. Zhang, Explicit analytical solutions of 2-D laminar natural convection, *Int. J. Heat Mass Transf.* 46 (2003) 931–934. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00359-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00359-9).
- [353] B. Blocken, T. Defraeye, D. Derome, J. Carmeliet, High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building, *Build. Environ.* 44 (2009) 2396–2412. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.04.004>.
- [354] M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, J.L.M. Hensen, Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty, *Appl. Therm. Eng.* 56 (2013) 134–151. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003>.
- [355] J.L.M. Hensen, R. Lamberts, C.O.R. Negrao, A view of energy and building performance simulation at the start of the third millennium, *Energy Build.* 34 (2002) 853–855. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00063-4).
- [356] API STANDARD 521, Pressure-relieving and Depressuring Systems, sixth, API Publishing Services, Washington, DC, 2014.
- [357] P.K. Raj, A review of the criteria for people exposure to radiant heat flux from fires, *J. Hazard. Mater.* 159 (2008) 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.120>.
- [358] J. Casal Fàbrega, H. Montiel Boadas, E. Planas Cuchi, J.A. Vílchez Sánchez, Análisis del riesgo en instalaciones industriales, (1999). <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36154> (accessed March 15, 2023).
- [359] W.P. Crocker, D.H. Napier, Thermal Radiation Hazards of Liquid Pool Fires and Tank Fires, in: *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, 1986: pp. 159–184.
- [360] D.G. Lilley, Minimum safe distance from pool fires, *J. Propuls. Power.* 16 (2000) 649–

652. <https://doi.org/10.2514/2.5623>.
- [361] M.J. Campbell, P.E. Dennison, M.P. Thompson, B.W. Butler, Assessing Potential Safety Zone Suitability Using a New Online Mapping Tool, *Fire*. 5 (2022). <https://doi.org/10.3390/fire5010005>.
- [362] A. Ganteaume, B. Guillaume, B. Girardin, F. Guerra, CFD modelling of WUI fire behaviour in historical fire cases according to different fuel management scenarios, *Int. J. Wildl. Fire*. 32 (2023) 363–379. <https://doi.org/10.1071/wf22162>.
- [363] X. Silvani, F. Morandini, J.F. Muzy, Wildfire spread experiments: Fluctuations in thermal measurements, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 36 (2009) 887–892. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.008>.
- [364] L. Terrei, A. Lamorlette, A. Ganteaume, Modelling the fire propagation from the fuel bed to the lower canopy of ornamental species used in wildland-urban interfaces, *Int. J. Wildl. Fire*. 28 (2019) 113–126. <https://doi.org/10.1071/WF18090>.
- [365] X. Zhou, H. Lin, H. Lin, Global Sensitivity Analysis, *Encycl. GIS*. (2008) 408–409. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1\\_538](https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_538).
- [366] J.K. Adou, A.D.V. Brou, B. Porterie, Modeling wildland fire propagation using a semi-physical network model, *Case Stud. Fire Saf.* 4 (2015) 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.csfs.2015.05.003>.
- [367] D. Mohamed, Un modèle de propagation de feux de végétation à grande échelle, Université de Provence - Aix-Marseille I, 2014.
- [368] J. Goupy, Les plans d'expériences, *Rev. Modul.* (2006) 74–116.