UNIVERSITE DE CORSE-PASCAL PAOLI
ECOLE DOCTORALE ENVIRONNEMENTET SOCIETE
UMR CNRS 6134 SPE

Thèse présentée pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN Mécanique des fluides,

Énergétique, Thermique, Combustion
Mention : Énergétique, Génie de procédés

Soutenue publiquement par

CARMEN AWAD

Le 22 Janvier 2021

Études numériques et expérimentales des feux marginaux

Directeurs :

M Rossi Jean-Louis, Dr-HDR, Université de Corse
M Marcelli Thierry, Dr, Université de Corse

Rapporteurs :

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

Jury

M ACCARY Gilbert, Pr, Lebanese University
M CHETEHOUNA Khaled, Pr, INSA Centre Val de Loire – Campus de Bourges
Mme Ganteaume Anne, Dr, INRAE, Aix-en-Provence
M MARCELLI Thierry, Dr, Université de Corse
Mme ROSSI Lucile, Dr-HDR, Université de Corse
M ROSSI Jean-Louis, Dr-HDR, Université de Corse
M SANTONI Paul-Antoine, Pr, Université de Corse
M SIMEONI Albert, Pr, Worcester Polytechnic Institute

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de thèse, le Dr Jean-Louis Rossi et le Dr Thierry Marcelli pour m'avoir fait confiance, guidé, encouragé et conseillé durant mes années de thèse. Leur aide et leurs conseils précieux ont été très utiles pour la réalisation de ce travail.

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

Je remercie le professeur Dominique Morvan, pour toute son aide et ses conseils pour la compréhension et l'utilisation du code numérique.

Je tiens à exprimer ici mes plus vifs remerciements au Dr Frédéric Morandini pour son aide dans la réalisation des travaux expérimentaux au sein du laboratoire UMR CNRS 6134 SPE de l'Université de Corse.

Que le Dr François Joseph Chatelon trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'aide apportée à la réalisation de ce travail.

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, Madame Lucile Rossi-Tison, Monsieur Paul-Antoine Santoni, et Monsieur Albert Simeoni pour leur participation au Jury.

Finalement, je veux remercier ma famille au Liban, Deeb, Nouhad, Marcelle, Carole et Joe pour tout leur soutien et leurs encouragements. Et de même, je remercie ma seconde famille

en Corse, Père louis, Georgette et Cynthia, c’est aussi grâce à vous que mon séjour en Corse est agréable.

Résumé

La lutte contre les incendies de forêt commence très en amont des départs de feux par une politique volontariste de prévention du risque. Une des méthodes la plus utilisée est la réduction de la charge du combustible en utilisant la technique des feux contrôlés appelés aussi feux dirigés. Ces feux sont souvent menés en forêt et doivent être à faible intensité pour ne pas causer des dégâts importants sur les arbres et sur le sol. Ainsi, ils sont toujours conduits avec des conditions de propagation marginales. Ainsi une légère modification de ces conditions peut provoquer leur extinction. En effet, la probabilité de succès de ce type de feux dépend de plusieurs facteurs naturels (température ambiante, humidité relative, vitesse de vent…) et également des propriétés physico-chimiques du couvert végétal (teneur en eau, forme, taille, masse volumique, chaleur spécifique de combustion…).

Le but de cette étude est d'identifier les principales propriétés du combustible permettant une propagation du feu dans ces conditions particulières, ainsi que l'influence de certaines propriétés du combustible (masse volumique, charge, …), et des conditions météorologiques (vitesse de vent, température ambiante, …) sur le comportement des feux marginaux. La valeur seuil de la teneur en eau provoquant une extinction sera plus particulièrement investiguée.

Dans un premier travail portant sur la détermination de la teneur en eau d'extinction sous conditions de vent et pente nuls, trois modèles ont été utilisés : un modèle physique complet, basé sur une approche multiphasique (« FireStar2D »), un modèle analytique publié

en 2014 par Balbi *et al*., et deux modèles expérimentaux, dont le premier est basé sur des séries de tests de brûlages réalisés au sein du laboratoire UMR CNRS SPE 6134 de l'université de Corse et dont le deuxième, purement empirique, a été proposé par Wilson en 1985.

Ainsi, des simulations ont été réalisées avec FireStar2D à l'échelle du terrain, pour l'herbe et le maquis sous des conditions de vent faible et de pente nulle. En outre, des tests de brûlages sont menés à partir de la frisure de bois à l'échelle du laboratoire.

Les différents résultats des simulations et des tests expérimentaux sont en adéquation avec ceux obtenus avec le modèle semi-physique. De plus, cette étude a permis de mettre en évidence l'effet de la charge surfacique et du LAI, « Leaf Area Index » sur le seuil d'extinction relié à la teneur en eau de la végétation.

La deuxième partie de recherche a porté sur la détermination de la teneur en eau d'extinction sous condition d'un vent modéré ou fort. Des simulations numériques sont menées à l'échelle du terrain avec de l'herbe sous condition de vent afin de relier la teneur en eau d'extinction à la vitesse du vent et à la charge surfacique du combustible. Cette étude a permis également d'évaluer l'influence du vent et de la teneur en eau sur le comportement d'un feu marginal et plus particulièrement sur les caractéristiques de la flamme.

Les résultats de ce travail de recherche sont encourageants et très intéressants pour les opérationnels qui travaillent dans les domaines de la gestion de terrain et de la lutte contre les incendies, vu l'importance des applications des feux marginaux dans ces deux domaines.

Mots clés : feux marginaux, simulation numérique, extinction des feux, modélisation des feux, combustion, teneur en eau d'extinction, dynamique des feux, feux dirigés.

Abstract

Wildfire suppression begins before the start of a fire incidence with the application of many proactive prevention policies. One of the most common method is the reduction of the fuel load accumulation by using controlled fires techniques also called prescribed fires. These fires are often conducted in forests and their intensity must be low to prevent any major damage on trees and on the soil. Thus, they must propagate under marginal conditions. So, a slight modification of the propagation conditions can cause their extinction. Indeed, the probability of sustainability of this type of fire depends on several natural factors (ambient temperature, relative humidity, wind speed, etc.) and also on the fuel properties (water content, shape, size, density, specific heat of combustion…).

The aim of this study is to identify the fuel properties allowing fire propagation under these particular conditions. Also, the influence of some fuel properties (density, load, etc.), and of meteorological conditions (wind speed, ambient temperature, etc.) on the behavior of marginal fires and especially on the fuel moisture content of extinction are investigated.

During a first work about the determination of the threshold value of the fuel moisture content involving fire extinction under no wind and no slope conditions, three models were used: a complete physical model, based on a multiphase formulation (“FireStar2D”), an analytical model published in 2014 by Balbi *et al*., and two experimental models. The first one is based on experimental tests carried out in the UMR SPE 6134 laboratory at the University of Corsica and the second one is an empirical model proposed by Wilson in 1985.

Thus, field scale simulations were carried out using FireStar2D, with grassland and shrubs as fuel under conditions of light wind and no slope. Moreover, laboratory scale experimental burnings were conducted with excelsior fuel beds. The different results of the simulations and the burning tests are in agreement with those obtained with the semi-physical model. In addition, the effect of fuel load and the LAI “Leaf Area Index” on the fuel moisture extinction threshold are studied.

In a second study, several field scale numerical simulations are conducted with grassland under non-zero wind conditions in order to relate the fuel moisture content threshold to wind speed and to fuel load. This study also allows us to evaluate the influence of wind speed and fuel moisture content on marginal fire behavior and especially on flame characteristics.

The results are encouraging and interesting to operational people working in fire management and firefighting fields, given the importance of marginal fire applications in these two domains.

Keywords: marginal fires, numerical simulation, fire extinction, fire modeling, combustion, fuel moisture content, fire dynamics, prescribed fires.

Table des matières

Remerciements ..... **i**
Résumé ..... **iii**
Abstract ..... **v**
Table des matières ..... **vii**
Liste des figures ..... **xi**
Liste des Tableaux ..... **xvi**
Nomenclature ..... **xviii**
Chapitre I. Contexte général **1**
I.1 Le couvert végétal méditerranéen et les différents types de feux de forêt 4
I.2 Description simplifiée de la propagation d'un feu de forêt 7
I.3 Le risque d'incendie 9
I.3.1 Contexte global 9
I.3.2 Influence de la végétation sur le risque d'incendie 10
I.3.3 Influence des conditions climatiques et météorologiques sur le risque d'incendie 11
I.3.4 Impacts des incendies sur la santé 12
I.3.5 Techniques utilisées pour diminuer le risque incendie 15
I.4 La Modélisation : outil pour la réduction du risque incendie 18
I.4.1 Classifications des modèles : empiriques, semi-physiques, physiques complets et physiques simplifiés 19
I.4.2 Les modèles de végétation 20

I.5 Apport du travail effectué 23

I.5.1 Importance de l'étude des feux marginaux et des critères de non propagation 25

I.5.2 La technique du brûlage dirigé 26

I.6 Approche utilisée et plan du mémoire 32

Chapitre II. Détermination de la teneur en eau du combustible conduisant à l'extinction du feu 34

II.1 La teneur en eau de la végétation 34

II.2 Teneur en eau de la végétation et comportement des feux 35

II.2.1 Seuil de la teneur en eau correspondant à l'extinction du feu 38

II.3 Modélisation physique simplifiée 41

II.3.1 Les hypothèses simplificatrices 42

II.3.2 Équations de base du modèle 46

II.4 Seuil d'extinction lié à la teneur en eau du combustible 54

II.5 Modélisation empirique : formule de Wilson 58

II.5.1 LAI : définition et importance 58

II.5.2 Tests expérimentaux 60

II.5.3 Résultats et discussions 61

Chapitre III. Tests expérimentaux à l'échelle du laboratoire 63

III.1 Choix et conditionnement du combustible 64

III.1.1 Choix du combustible 64

III.1.2 Conditionnement du combustible 65

III.2 Procédés expérimentaux 69

III.2.1 Dispositif expérimental 69

III.2.2 Tests expérimentaux 72

Chapitre IV. Un outil d'expérimentation numérique : FireStar2D 75
IV.1 Présentation de FireStar2D 75
IV.2 Formulation multiphasique 78
IV.2.1 Modélisation de la phase solide 78
IV.2.2 Modélisation de la phase gazeuse 81
IV.2.3 Modèle de turbulence RNG (k - ε) 82
IV.2.4 Le modèle « Eddy Dissipation Concept » (EDC) 84
IV.2.5 Modèles des transferts thermiques convectifs et radiatifs 86
IV.3 Méthode de résolution numérique 88
IV.3.1 Création du maillage du domaine 88
IV.3.2 Séquence de calcul 90
IV.3.3 Résolution des équations : Méthode des volumes finis 91
Chapitre V. Étude des feux marginaux à plat et sans vent 93
V.1 Étude à l'échelle du laboratoire 94
V.1.1 Présentation des différentes configurations étudiées 95
V.1.2 Comparaison des résultats expérimentaux avec l'approche semi-physique, FireStar2D et la loi de Wilson 96
V.1.3 Confrontation des données expérimentales tirées de la littérature avec l'approche semi-physique, FireStar2D et la loi de Wilson 106
V.2 Étude à l'échelle du terrain 110
V.2.1 Cas de l'herbe 111
V.2.2 Cas de végétations hétérogènes 116
V.3 Influence de certaines propriétés du combustible sur la teneur en eau d'extinction 119
V.3.1 Effet de la charge surfacique sur la teneur en eau d'extinction 119

V.3.2 Étude d'un cas particulier : LAI constant 125

V.4 Influence du vent 127

V.5 Conclusion du chapitre et projection sur le chapitre suivant 130

Chapitre VI. Étude des feux marginaux à plat et avec vent 132

VI.1 Présentations des configurations étudiées 134

VI.2 L'influence de l'intensité du vent et de la teneur en eau sur le comportement du feu ... 136

VI.2.1 Influence du vent sur la teneur en eau d'extinction du feu 139

VI.2.2 Influence de la charge surfacique sur la teneur en eau d'extinction du feu 145

VI.3 Détermination d'une loi empirique pour la détermination de la teneur en eau d'extinction du feu 147

VI.4 Influence du vent et de la teneur en eau sur les caractéristiques de la flamme 148

VI.5 Modélisation adimensionnelle de la teneur en eau marginale 152

VI.6 Conclusion 153

Conclusions et perspectives 155

Bibliographie 161

Liste des figures

Figure 1.1 Les différents écosystèmes existant dans la région méditerranéenne (crédit : “alpes-maritimes.gouv.fr“). 5

Figure 1.2 Propagation d’un feu de sol méditerranéenne (crédit :“alpes-maritimes.gouv.fr“). 6

Figure 1.3 (a) et **(b)** feu de surface ; **(c)** feux de cimes méditerranéenne (crédit :“alpes-maritimes.gouv.fr“). 7

Figure 1.4 Étapes successives de propagation d’un feu de surface : (a) réchauffement du combustible par les flux de chaleur absorbée par la végétation ; (b) l’évaporation de l’eau du combustible ; (c) la pyrolyse ; (d) la combustion. 8

Figure 1.5 Triangle du feu lié à l’environnement. 27

Figure 1.6 Principales techniques de feux dirigés. 29

Figure 2.1 Inclinaison de la flamme. 43

Figure 2.2 Inclinaison de la flamme pour une propagation sous condition de vent nul. 44

Figure 2.3 Géométrie supposée rectangulaire de la flamme. 44

Figure 2.4 Géométrie triangulaire de la flamme. 45

Figure 2.5 Rayonnement de la flamme. 49

Figure 2.6 (a) Vue schématique de la flamme pendant une propagation de feu de surface, en négligeant l’effet de refroidissement par l’air ; **(b)** Vue schématique de la flamme pour une propagation sans vent en tenant compte de refroidissement d’air 51

Figure 3.1 Distribution du combustible sur la table de combustion d'une manière homogène. 64

Figure 3.2 Pesage de la quantité nécessaire de la frisure de bois à 13,2 % d'humidité. 67

Figure 3.3 L'immersion totale de la frisure de bois dans l'eau 67

Figure 3.4 Séchage à l'air libre de la frisure de bois. 68

Figure 3.5 Dispositif expérimental. 70

Figure 3.6 Front de la flamme vertical obtenu pour un test de brûlage d'un lit de frisure de bois caractérisé par une charge de 0,2 kg m^{-2}. 70

Figure 3.7 Dispositif expérimental. 71

Figure 3.8 Conception de la ligne d'allumage à l'aide du méthanol versé sur les premiers 5 cm du combustible. 73

Figure 4.1 Grilles décalées des scalaires et des composantes de vitesse. 89

Figure 4.2 Notation du volume de contrôle. 91

Figure 5.1 La variation du rapport ROS/ROS (0), à plat et sans vent en fonction de la teneur en eau pour un lit de frisure de bois de 8 cm d'épaisseur. 98

Figure 5.2 Puissance des feux évalués pour un échantillon des tests de brulage réalisés à l'université de Corse avec la frisure de bois d'épaisseur 8 cm pour 4 valeurs de teneurs en eau : 0 ; 14 ; 30 et 51 %. 100

Figure 5.3 $\psi/\psi(t=0)$ évalué pour un échantillon des tests de brûlages réalisés à l'Université de Corse avec la frisure de bois d'épaisseur 8 cm pour quatre valeurs de teneurs en eau : 0 ; 14 ; 30 et 51 %. 101

Figure 5.4 Flux total évalué pour un échantillon des tests de brulage réalisé à l'Université de Corse avec de la frisure de bois d'épaisseur 8 cm pour quatre valeurs de teneurs en eau : 0 ; 14 ; 30 et 51 %. 102

Figure 5.5 Profil de température évalué avec FireStar2D avec un lit en frisure de bois d'épaisseur 8 cm. 104

Figure 5.6 Teneur en eau d'extinction en fonction de l'épaisseur du lit évaluée avec le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson pour la frisure de bois utilisée lors des tests de 1985 par Wilson [19]..... 107

Figure 5.7 La teneur en eau d'extinction en fonction de l'épaisseur du combustible, évaluée avec le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson pour la configuration des aiguilles de pin tirée des travaux de Wilson 1985. 108

Figure 5.8 Les valeurs maximales de la teneur en eau de la végétation en fonction de Leaf Index Area (LAI). Test positif : propagation. Test négatif : pas de propagation. 110

Figure 5.9 Représentation du domaine et des conditions limites correspondants aux simulations numériques 2D réalisées avec l'herbe « australienne ». 112

Figure 5.10 Évolution de ROS/ROS(0) à plat et à condition d'un vent nul en fonction de la teneur en eau pour un lit de l'herbe australien de 70 cm d'épaisseur. 114

Figure 5. 11 Champs de température et les vecteurs de vitesses évalués pour l'herbe d'épaisseur 70 cm sous condition d'un vent très faible : U_{10} = 0,1 m s^{-1}. 115

Figure 5.12 Teneur en eau d'extinction du feu évaluée expérimentalement pour la frisure de bois pour les charges surfaciques suivantes : 0,15 ; 0,2 et 0,4 kg m^{-2}. 123

Figure 5.13 Évolution de m_x pour une fraction volumique constante de 0,0032 et dans le cas de deux augmentations de la charge surfacique (33 % et 100 %). 124

Figure 5.14 Seuils d'extinction en fonction de la charge surfacique de la frisure de bois ayant une fraction volumique constante de 0,0032. 125

Figure 5.15 Teneur en eau d'extinction théorique en fonction de l'épaisseur de lit du combustible et de la fraction volumique évaluée à l'aide du modèle semi-physique et FireStar2D pour l'herbe « australienne » ayant un LAI constant égale à 2,8. 127

Figure 5.16 Rapport adimensionnel ROS/U_{10} en fonction de l'inverse du nombre de convectif du Byram 1/N_c, évalué pour quatre vitesses de vent (0,5 ; 1 ; 1,25 et 1,5 m s^{-1}) pour de l'herbe d'épaisseur 70 cm. 130

Figure 6.1 Représentation du domaine des calculs numériques et des conditions limites correspondants aux simulations numériques 2D réalisées avec l'herbe. 135

Figure 6.2 Évolution du front de pyrolyse en fonction du temps obtenue avec FireStar2D pour l'herbe « australienne » d'épaisseur 50 cm, sous condition d'un vent de 4 m s^{-1} et pour deux teneurs en eau : 148 et 149 %. 136

Figure 6.3 Évolution de la teneur en eau d'extinction de l'herbe en fonction (a) de la vitesse de vent mesurée à 10 m d'altitude et (b) en fonction de la charge surfacique. 138

Figure 6.4 Champs de température et lignes de courant de l'écoulement (dans les directions X et Z) évalués pour U_{10} = 2 m s^{-1}, e = 0,5 m (δ = 0,5 kg m^{-2}, et pour deux valeurs de m (a) m = 5 %, (b) m = 90 %. 140

Figure 6.5 Champs de température et lignes de courant de l'écoulement (dans les directions X et Z) évalués pour U_{10} = 4 m s^{-1}, e = 0,5 m (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour deux valeurs de m (a) m = 5 %, (b) m = 90%. 141

Figure 6.6 Profil de température du gaz, de la fraction massique de l'O_2 et de la vapeur d'eau dans le mélange gazeux évalués à la surface de la végétation (z = e) pour e = 0,5 m (σ = 0,5 kg m^{-2}), U_{10} = 4 m s^{-1} et pour deux valeurs de m : (a) m = 5 %, (b) m = 90 %. 142

Figure 6.7 Champs de température et lignes de courant de l'écoulement (dans les directions X et Z) évalués pour U_{10} = 7 m s^{-1}, e = 0,5 m (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour deux valeurs de m (a) m = 5 %, (b) m = 90 %. 143

Figure 6.8 Champs de température et lignes de courant de l'écoulement (dans les directions X et Z) évalués pour U_{10} = 10 m s^{-1}, e = 0,5 m (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour deux valeurs de m (a) m = 5 %, (b) m = 90 %. 144

Figure 6.9 Flux radiatif reçu par un point du combustible non brûlé de coordonnées (70 m, 0,1 m) obtenu sous condition d'un vent U_{10} = 2 m s^{-1}, m = 10 %, et pour les différentes charges surfaciques lorsque la flamme est située à X = 69 m. 146

Figure 6.10 Temps de résidence en fonction de m obtenu pour combustible d'épaisseur 50 cm (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour 4 vitesses du vent. La flèche verticale montre la teneur en eau d'extinction..... 149

Figure 6.11 Nombre convectif de Byram en fonction de m obtenu pour un combustible d'épaisseur 50 cm (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour deux valeurs du vent. La flèche verticale montre la teneur en eau d'extinction. 150

Figure 6.12 Distribution de la fraction massique de H_2O et lignes de courant obtenues pour (a) U_{10} = 2 m s^{-1}, m = 5 %, et e = 0,5 m, (b) U_{10} = 4 m s^{-1},m = 90 %, et e = 0,5 m. 151

Figure 6.13 Épaisseur de la flamme en fonction de m obtenue pour combustible d'épaisseur 50 cm (δ = 0,5 kg m^{-2}) pour 4 vitesses du vent. La flèche verticale montre la teneur en eau d'extinction..... 151

Figure 6.14 Teneur en eau du combustible en fonction du nombre convectif de Byram. Les symboles en vert correspondent aux configurations des feux marginaux où une augmentation de 1 % de m aboutit à l'extinction du feu. Les symboles en rouge correspondent aux feux qui ont réussi à propager jusqu'à la fin du domaine..... 153

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Données utilisées dans le cas de l'herbe [18]. 56

Tableau 2.2 Étude de sensibilité appliquée au modèle semi-physique du seuil d'extinction de la teneur en eau pour le combustible herbacé. 57

Tableau 2.3 Les propriétés physico-chimiques des différentes espèces des combustibles utilisés pour réaliser les tests. 61

Tableau 3.1 Propriétés physico-chimiques du lit de combustible utilisé pendant les expériences (frisure de bois) [203,204] 65

Tableau 3.2 Données expérimentales relevées pour les tests expérimentaux réalisés au sein de l'Université de Corse avec la frisure de bois. 73

Tableau 5.1 Seuils d'extinction obtenus avec la frisure de bois pour trois charges surfaciques (0,15 kg m^{-2} ; 0,20 kg m^{-2} et 0,40 kg m^{-2}) à l'aide de tests expérimentaux, de FireStar2D, du modèle semi-physique et de la loi de Wilson 105

Tableau 5.2 Propriétés physiques de l'herbe « australienne ». 111

Tableau 5.3 Propriétés physiques du modèle de végétation équivalent du Genesta Salzamannii [106]. 117

Tableau 5.4 Propriétés physiques du modèle de végétation équivalent du Arbutus Unedo [251]. 117

Tableau 5.5 Les teneurs en eau d'extinction évaluées à l'aide du modèle semi-physique, FireStar2D et la loi empirique de Wilson pour le Genesta Salzamannii et l'Arbutus Unedo.118

Tableau 5.6 Teneurs en eau d'extinction en fonction de la charge surfacique évaluées à l'aide de FireStar2D et du modèle semi-physique pour la configuration de l'herbe « australienne » à plat et sans vent. 121

Tableau 5.7 Teneur en eau d'extinction du combustible évaluée à l'aide FireStar2D pour le cas de l'herbe australien d'épaisseur 70 cm et évaluée pour 6 valeurs du vent (0 ; 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 1,25 et 1,5 m s^{-1}). 128

Nomenclature

SYMBOLES UTILISÉS

$a, b, q, c, c^*,$ d^*, a_b	Paramètres du modèle physique simplifié (-)
B	Constante de Stefan-Boltzmann ($5{,}67\ 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4})
C_{pg}	Capacité calorifique des gaz (J kg^{-1} K^{-1})
C_{pfu}	Capacité calorifique du combustible (J kg^{-1} K^{-1})
C_D	Coefficient de trainée des particules solides
f_l	Fraction de la partie vivante du combustible
F	Force de trainée
e	Épaisseur du combustible (m)
h_{conv}	Coefficient de transfert de chaleur convectif
L	Profondeur du front de flammes (m)
J	Irradiation totale
K	Énergie cinétique turbulente
LAI	Leaf Area Index
g	Accélération gravitationnelle (m s^{-2})
H_{fl}	Hauteur de la flamme (m)
l	Épaisseur du corps de la flamme (m)
$\vec{n}$	Vecteur unitaire perpendiculaire au front de flammes

$\vec{N}$	Vecteur unitaire perpendiculaire au terrain
m	Teneur en eau du combustible (-)
p_s	Productivité du terrain
P_r	Nombre de Prandlt turbulent
Q	Énergie dégagée par unité de longueur du front de feu (kW m^{-1})
Q_T	Énergie nécessaire pour la propagation du feu (kW m^{-1})
$Q_{+/-}^{(s)}$	Énergie échangée par convection et radiation entre le solide et la phase gazeuse
Q_{Conv}^{k}	Énergie convective échangée entre la phase gazeuse et le solide
$Q_{rad}^{(s)}$	Énergie radiative échangée entre la phase gazeuse et le solide
q_j	Énergie conductrice
R_{eT}	Nombre de Reynolds turbulent
ROS	Vitesse de propagation du feu (m s^{-1})
ROS(0)	Vitesse de propagation du feu mesurée pour une teneur en eau nulle (m s^{-1})
r	Rapport entre la vitesse avec condition de pente et de vent et la vitesse sans condition de pente ou de vent (-)
s_t	Coefficient stœchiométrique de la base de la flamme (-)
S	Surface foliaire (-)
S_e	Constante (m^2)
s	Rapport surface-volume des particules de combustible (m^{-1})
T	Température (K)
t	Temps (s)
u,v	Vitesse des gaz (m s^{-1})
U	Vitesse du vent (m s^{-1})

$\dot{\omega}$	Taux de réaction
$\bar{\dot{\omega}}_{\alpha}$	Taux de destruction/formation d'une espèce chimique α
X	Coordonnée spatiale (m)
Y	Fraction massique
ΔH	Chaleur de combustion (kJ kg^{-1})
Δh	Enthalpie de combustion (kJ kg^{-1})
Δh_{H_2O}, Δh_{pyr}, Δh_{char}	Enthalpie de vaporisation, de pyrolyse et de combustion de carbone (kJ kg^{-1})

LETTRES GRECQUES

α	Angle d'inclinaison du terrain (°)
β	Fraction volumique occupée par la strate végétale (-)
ε	Taux de dissipation turbulent
γ_c	Angle d'inclinaison de la flamme (°)
χ	Fraction de l'énergie rayonnée(-)
Φ	Flux rayonné (kW m^{-2})
δ	Profondeur optique (m)
ε	Émissivité (-)
γ	Angle d'inclinaison de la flamme par rapport à la perpendiculaire au sol(°)
μ	Paramètre intervenant dans le calcul de l'énergie rayonnée par la base des flammes (m^{-1})
θ	Angles permettant de calculer la quantité d'énergie rayonnée par le corps de la flamme
ρ	Masse volumique (kg m^{-3})

λ	Angle entre la direction principale du front de flammes et la direction de la pente du terrain (°)
σ	Charge surfacique (kg m^{-2})
σ_G	Coefficient d'extinction du mélange gazeux et des suies
$\dot{\sigma}$	Perte de masse (kg s^{-1})
ζ	Charge volumique (kg m^{-3})
τ	Temps de résidence de la flamme (s)
τ_0	Paramètre du temps de résidence de la flamme (75591 s m^{-1})
τ_η	Échelle de temps de Kolmogorov
τ_t	Échelle de temps de turbulence
τ_{mix}	Temps de mélange (s)
τ_{opt}	Coefficient d'épaisseur optique critique (-)
Γ	Fonction unité (-)
Ψ_0	Masse mesurée pour une teneur en eau nulle (kg)
Ψ_i	Masse instantanée (kg)
ν	Coefficient stœchiométrique
σ_{ij}	Tenseur de pression

INDICES ET EXPOSANTS

a	Ambiant
b	Base de la flamme
d	Combustible mort
g	Gaz
k	Famille d'élément de végétation

l	Combustible vivant
N	Hauteur en z de la mesure
s	Matière sèche
x	Extinction
1/2	À mi-hauteur de flammes
0	Conditions de pente nulle et de vent nul
Char	Charbon
fl	Flamme
v	Végétation
conv	Convection
i	Induit
ig	Ignition
H_20	Eau
pyr	Pyrolyse

Chapitre I. Contexte général

En général, la définition d'un feu de forêt dépend du pays et est fonction de celle de la forêt. En France, est considéré comme feu de forêt, tout feu qui atteint des forêts, des landes, des garrigues ou du maquis d'une superficie d'au moins un hectare d'un seul tenant [1]. Les feux de forêt sont considérés comme un risque majeur pour de nombreux pays du globe. Ce risque est particulièrement important pour les régions ayant un climat de type méditerranéen. Le climat méditerranéen est un climat tempéré caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides [2]. Les températures moyennes annuelles varient entre 14 et 20 °C. Les températures minimales ne descendent que très rarement sous la barre des 0 °C et les températures maximales sont inférieures à 50 °C. La présence des mers et des océans exerce un effet d'atténuation de ces dernières. Ainsi, l'écart entre les plus élevées et les plus basses est moins important que pour les climats continentaux. Les précipitations sont concentrées dans la période hivernale et atteignent des valeurs annuelles de 250 à 1 300 mm. En ce qui concerne la saison chaude, ces précipitations sont faibles ou presque nulles [3]. Cependant, il y a une forte variabilité suivant les années en ce qui concerne ces valeurs. Ces conditions climatiques caractérisent cinq régions différentes du monde : le Bassin Méditerranéen (2 300 000 km^2), la

Californie aux États-Unis (324 000 km^2), la zone centrale du Chili (140 000 km^2), l'Afrique du Sud (90 000 km^2) et l'Australie du Sud-Ouest (90 000 km^2) [4]. Les zones mentionnées ci-dessus occupent donc 2 966 260 km^2 ce qui correspond approximativement à 2 % de la superficie des terres émergées du globe (149 400 000 km^2). Le climat méditerranéen est un facteur déterminant en raison de son importance dans l'établissement, l'organisation et le maintien des écosystèmes.

Le contexte climatique est donc fortement propice aux feux de forêts dans ces régions. En effet, quelle que soit la zone, les températures élevées et l'absence de précipitations augmentent la dessiccation des végétaux et de ce fait le départ et la propagation des incendies. De plus, le vent facilite la propagation du front de flammes.

Les aléas qui menacent les forêts et les espaces naturels terrestres sont considérés comme des risques lorsqu'ils touchent directement les intérêts de la société. Ainsi, les incendies constituent une menace importante pour l'environnement, l'activité socio-économique et la sécurité des personnes. L'évolution des activités touristiques et les changements climatiques favorisent ce phénomène dont la fréquence et l'ampleur des conséquences sont de plus en plus dévastatrices [5]. En zone méditerranéenne, le problème des incendies est d'autant plus aigu que les conditions climatiques sont favorables à la propagation du feu [6]. Durant les périodes estivales, les incendies progressent très vite sous l'influence combinée des vents et de la sécheresse. Les feux de forêt ont aussi un impact considérable sur l'écosystème naturel et contribuent également à l'augmentation des gaz atmosphériques qui sont soupçonnés d'être un facteur aggravant des changements climatiques [7]. Dans la plupart des pays européens, l'exode rural et l'augmentation de la densité des habitations individuelles en périphérie des grandes villes durant le 20ème siècle ont eu comme conséquence d'augmenter la vulnérabilité des forêts. Par exemple, pour les régions du Sud de l'Europe, environ 350 km^2 de forêts et de maquis brûlent chaque année [8].

Les conditions météorologiques, la végétation et la topographie sont donc des facteurs environnementaux très importants qui influent fortement sur la nature des incendies [9,10]. Cependant, il est à noter qu'il a été montré que la cause des départs des feux de forêt est essentiellement due à l'activité humaine [11,12]. C'est ainsi le cas pour les régions du bassin méditerranéen caractérisées par une densité de population assez importante [13]. La Corse est une région très touchée par ces phénomènes du fait de sa végétation particulière et de ses nombreux terrains accidentés. Elle est l'île la plus boisée de la Méditerranée. En effet, la superficie recouverte par les forêts est de 401 817 hectares, soit 46% de sa superficie. Cette région est même régulièrement soumise à des incendies en hiver. Par exemple, en Février 2020, lors d'un épisode venteux un départ de feu causé par une activité humaine a engendré un incendie qui a détruit près de 6 000 hectares de végétation en Corse du Sud non loin des communes de Quenza et Solaro [14]. La problématique du risque incendie est ainsi devenue une priorité pour les personnes en charge de l'aménagement du territoire et de la lutte contre les incendies sur ce territoire.

Une méthode adoptée, par les opérationnels en Corse, pour réduire ce risque incendie consiste à diminuer la charge du combustible sur une zone donnée en utilisant la technique du brûlage dirigé [15]. Lors d'un brûlage dirigé, le feu doit consumer une végétation qui est souvent du maquis ou des broussailles avec une faible intensité afin que son impact sur les arbres et le sol soit minime. Ainsi, ces feux sont menés la plupart du temps en hiver et au début du printemps, lorsque la teneur en eau du couvert végétal est assez élevée [16]. Ces conditions de propagation sous lesquelles les brûlages dirigés sont réalisés, que l'on qualifie de marginales [17], assurent également une sécurité optimale des opérations.

Sous ces conditions marginales, la réussite des brûlages dépend de plusieurs facteurs tels que la température ambiante, l'humidité relative de l'air, la vitesse de vent et de certaines caractéristiques du couvert végétal comme sa teneur en eau ou sa charge surfacique [18,19].

Une modification de la valeur de ces facteurs peut aboutir à l'échec de la propagation. Prédire les conditions optimales de réussite des brûlages dirigés peut s'avérer d'une grande utilité pour les opérationnels.

Les membres du projet « feux » de l'UMR CNRS Sciences Pour l'Environnement 6134 de l'Université Pasquale Paoli à Corte étudient, depuis près d'une trentaine d'années, le comportement et l'impact des feux de forêts [20]. Le projet « Feux » est composé de 22 membres où enseignants chercheurs, chargés de recherche CNRS, ingénieurs de recherche, ATER et doctorants travaillent dans les domaines de la physique, de l'écologie, de la chimie, de l'informatique, du traitement de l'image et la vision. Les travaux menés recouvrent aussi bien des approches théoriques, numériques qu'expérimentales. Les membres du projet ont comme objectif assumé de répondre aux demandes des opérationnels, le but final étant de trouver les moyens d'améliorer les techniques de lutte et de prévention actuellement utilisées pour réduire le risque incendie, techniques qui pourraient ensuite s'inscrire dans une politique plus globale de gestion de ce risque. L'objectif plus spécifique du travail réalisé lors de cette thèse est de prédire les conditions optimales qui permettent la propagation d'un brûlage dirigé sous des conditions marginales.

I.1 Le couvert végétal méditerranéen et les différents types de feux de forêt

Les régions caractérisées par un climat méditerranéen montrent une exceptionnelle biodiversité et une grande hétérogénéité du couvert végétal. En effet, elles sont caractérisées par la présence de plus de 48 250 espèces de végétaux selon [21] et entre 45 000 et 60 000 espèces selon l'importance des territoires en prenant en compte l'Afrique du Sud [22]. Trois types d'écosystèmes peuvent y être identifiés en se basant sur le critère physionomique (Figure 1.1) [2] : (1) Les forêts qui se trouvent dans les zones humides à semi-aride. Par exemple, les forêts de chênes à feuilles caduques correspondent aux milieux les plus humides

et les forêts de Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) qui sont présents dans les zones les plus xériques ; (2) les végétations composées essentiellement de ligneux bas qui ne dépassent pas 7 m de hauteur. Ce type de couvert végétal est appelé localement : *maquis* en France, *macchia* en Italie, *Chaparral* en Californie, *matorral* en Espagne et Chili, *mallee* en Australie, *stranvled, renosterveld* en Afrique du Sud ; (3) cependant, lorsque cette végétation est plus basse et moins dense sur des terres plus arides les termes employés deviennent : garrigue en France, *gariga* en Italie, *phrygana* en Grèce, *Coastal sage* en Californie, *jaral* au Chili, *mallee* en Australie et *Fynbos* utilisé en Afrique du Sud.

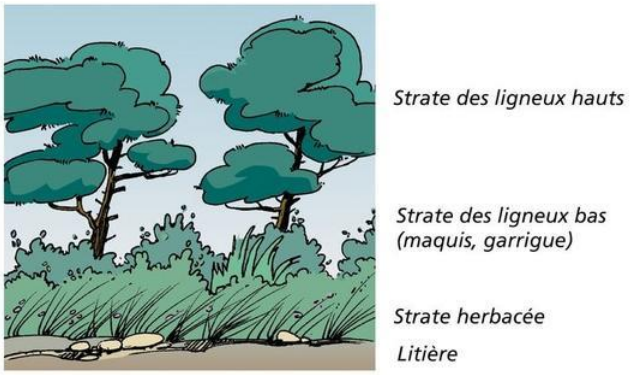


Figure 1.1 *Les différents écosystèmes existant dans la région méditerranéenne (crédit : "alpes-maritimes.gouv.fr").*

L'environnement méditerranéen présente donc une végétation très hétérogène qui dépend de la topographie, de l'exposition au vent, de la distance du site à la mer, de l'altitude, ou encore de l'occupation par l'homme. Ces différentes caractéristiques font qu'il est très difficile de définir un type unique de couvert végétal pouvant être représentatif de l'ensemble de ces territoires. Cette diversité de couverts est donc une particularité forte de cette zone climatique par rapport à d'autres grandes zones du globe disposant d'une végétation plus uniforme.

Un territoire situé dans une région climatique de type méditerranéen peut être soumis à trois types de propagations de feux de forêt [23] : (1) les feux de sol (Figure 1.2) 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 couver très longtemps en profondeur, ce qui rend plus difficile son extinction définitive. Il arrive que, en particulier durant les longues périodes de sécheresse, de tels feux brûlent tout l'hiver en profondeur et émergent de nouveau à la surface du sol avec l'arrivée du printemps (Figure 1.3) ; (2) les feux de surface (Figure 1.3 (a), Figure 1.3 (b)) qui brûlent les strates basses de la végétation, c'est-à-dire la partie supérieure de la litière, la strate herbacée et les ligneux bas. La propagation de ce type de feu peut être rapide lorsqu'il se développe librement, et si les conditions sont favorables à la propagation ; (3) les feux de cimes (Figure 1.3 (c)) qui brûlent la partie supérieure des arbres et forment une couronne de feu. Ils libèrent en général de grandes quantités d'énergie et leur vitesse de propagation est très élevée. Ils sont d'autant plus intenses et difficiles à contrôler que le vent est fort et le combustible sec. Il est important de noter que ces trois types de feu peuvent se produire simultanément sur une même zone donnée.

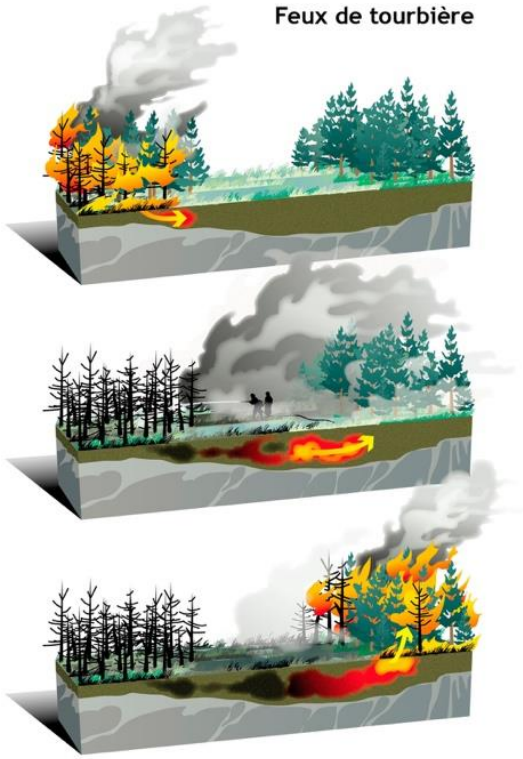


Figure 1.2 *Propagation d'un feu de sol méditerranéenne (crédit :"alpes-maritimes.gouv.fr").*



(a) **(b)** **(c)**

Figure 1.3 ***(a)*** *et* ***(b)*** *feu de surface ;* ***(c)*** *feux de cimes méditerranéenne (crédit :"alpes-maritimes.gouv.fr").*

I.2 Description simplifiée de la propagation d'un feu de forêt

La dynamique des feux est une combinaison complexe de différents phénomènes physiques et chimiques qui se déroulent dans un volume délimité par le combustible et l'air ambiant qui l'enveloppe [24]. Ce phénomène se déroule en quatre phases successives : (1) la phase de pré-inflammation, (2) la phase d'inflammation, (3) la combustion et finalement (4) la phase d'extinction.

Soit un volume de végétation non brûlé situé directement en amont d'un feu comme indiqué sur la figure 1.4. Ce volume est alors 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 (Figure 1.4 (a)). La température du combustible augmente alors jusqu'à 100 °C, où l'eau s'évapore d'une façon adiabatique (Figure 1.4 (b)). Le combustible finit par se déshydrater complétement 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 (Figure 1.4 (c)). 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 front de feu est suffisamment proche, la combustion commence, le mélange gazeux s'enflamme et le feu peut ainsi continuer à se propager (Figure 1.4 (d)). Le charbon qui s'oxyde à son tour émet du CO et du CO_2 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. Finalement, lorsque la végétation est complétement consommée, le feu s'éteint.

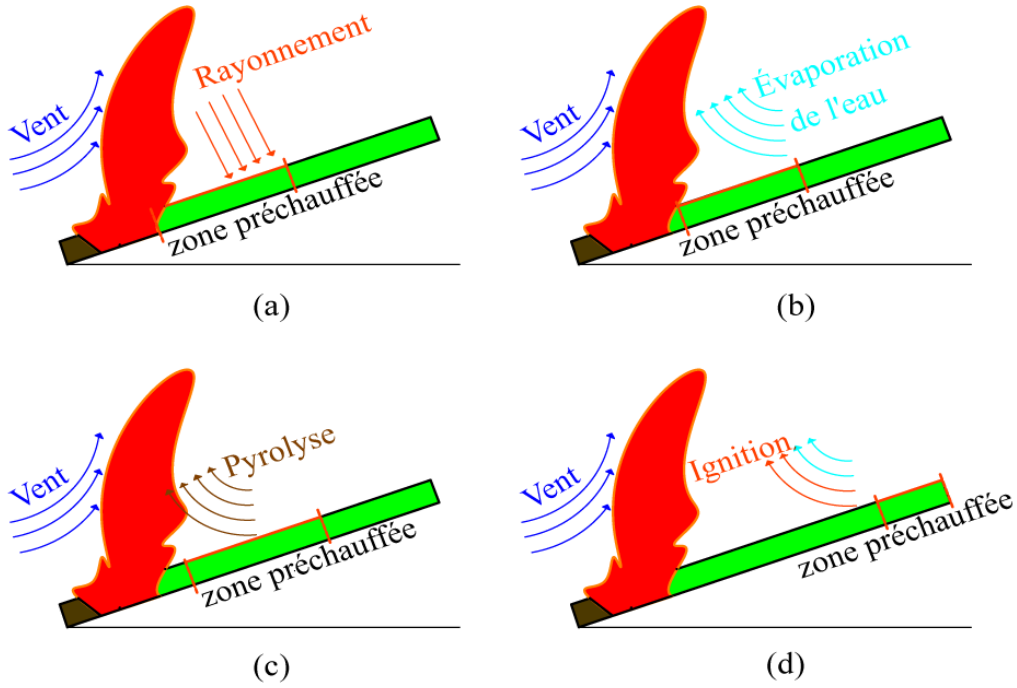


Figure 1.4 *Étapes successives de propagation d'un feu de surface :* (a) *réchauffement du combustible par les flux de chaleur absorbée par la végétation ;* (b) *l'évaporation de l'eau du combustible ;* (c) *la pyrolyse ;* (d) *la combustion.*

Ainsi, la dynamique des feux dépend de plusieurs facteurs qui ont des influences importantes sur le comportement de ce phénomène dans chaque phase de la propagation. Comprendre comment les différents facteurs environnementaux et les facteurs reliés directement aux combustibles influent sur la dynamique des feux aboutit à prédire finalement le comportement d'un feu, sa direction et sa vitesse de propagation. Toutes ces informations

sont essentielles et permettent de développer des outils d'aide à la décision réalistes pour les opérationnels. Ces outils sont amenés à jouer un rôle de plus en plus important lors de la conception des politiques d'aménagement du territoire pour la réduction du risque incendie [24,25]. Les différentes propriétés physico-chimiques de la végétation s'avèrent être d'une grande importance lors de la propagation d'un feu. Par exemple, plusieurs études montrent que la teneur en eau du combustible, l'intensité du vent et la topographie du terrain sont les facteurs les plus influents sur la dynamique des feux [26,27]. De même, il a également été avancé que le rapport surface-volume estimant la surface de contact des particules du combustible avec l'air ambiant influe notablement la vitesse de propagation des feux [28].

I.3 Le risque d'incendie

I.3.1 Contexte global

Chaque année de nombreuses régions du bassin méditerranéen sont touchées par des feux de forêt et d'importantes superficies sont parcourues par ces incendies causant des pertes économiques, environnementales et même humaines [29]. En Europe, approximativement 85% du total des surfaces brûlées sont dues à des incendies en France, Grèce, Italie, Portugal et Espagne [5]. Par exemple, les incendies de forêts ont détruit près de 178 000 hectares (ha) de forêts dans l'Union européenne en 2018 [30]. Pour cette année 2018, le nombre de feux et la répartition des surfaces brûlées furent les suivantes : en Italie 147 incendies, avec 14 649 ha brûlés ; en Espagne 104 incendies avec 12 793 ha brûlés ; au Portugal 86 incendies avec 37 357 ha brûlés ; au Royaume-Uni 79 incendies avec 18 032 ha brûlés et en Suède 74 incendies avec 21 605 ha brûlés. Il est à noter qu'aux premières heures de l'humanité, les incendies, avaient une origine naturelle. Ces feux étaient principalement provoqués par la foudre ou par des éruptions volcaniques. De nos jours, les activités humaines, qu'elles soient volontaires ou non sont les causes les plus fréquentes d'éclosion des feux de forêts [13,25,31–35]. La France est le

quatrième pays européen le plus boisé, sa surface contient environ 16,9 millions d'hectares de forêt ce qui la rend vulnérable au risque des incendies, notamment en période estivale. À côté des facteurs directs d'éclosions, d'autres éléments peuvent jouer aussi un rôle important dans l'estimation du comportement du feu et donc de l'évaluation du risque lié à ce phénomène [36]. Les plus évidents sont la végétation, les conditions météorologiques et climatiques. Mais un autre facteur supplémentaire joue un rôle majeur dans l'augmentation de ce risque et est lié au comportement des populations. L'extension des zones interface forêt-habitat (WUI[1]) en est un bon exemple [37].

De plus, depuis quelques années la nature des feux de forêt semble évoluer [13,38]. Des études récentes ont montré que seulement 2% du nombre total des feux de forêt causent les plus importants dégâts et semblent devenir la norme dans beaucoup de région du globe [5]. Ces feux sont dénommés feux extrêmes ou Méga Feux [39]. Un exemple d'un tel feu est celui qui s'est produit en Grèce dans la région d'Attica en juillet 2018 qui a détruit 1 650 maisons, brulé 1 431 ha et où 100 personnes ont trouvées la mort [29].

I.3.2 Influence de la végétation sur le risque d'incendie

Chaque végétation est considérée comme un « combustible » potentiel. Le type de la végétation, sa teneur en eau, sa structure et sa charge surfacique ont des conséquences sur le comportement du feu et donc son intensité. Par exemple, les maquis, les garrigues et les landes sont plus sensibles aux feux que d'autres végétations [40] du fait de leurs compositions chimiques. D'autre part, le risque d'incendie est lié fortement à la teneur en eau de la végétation. De nombreuses études montrent que la teneur en eau est corrélée directement à l'inflammabilité de la végétation [41–43]. Ainsi, elle est un indice essentiel d'estimation des risques d'incendies, de leurs intensités et d'estimation des surfaces brûlées [44,45]. En effet, les analyses des feux

[1] Wildland Urban Interface

extrêmes qui ont eu lieu en Méditerranée et en Amérique du nord montrent clairement que ces derniers se produisent lorsque la teneur en eau du combustible vivant est relativement faible (< 79%) [45,46].

Deux autres caractéristiques importantes de la végétation qui influent de manière conséquente sur la dynamique d'un incendie sont, d'une part, sa charge surfacique et d'autre part la continuité du couvert végétal sur le domaine étudié [47]. Un incendie est d'autant plus puissant que la charge de combustible est grande mais il est censé perdre sa capacité à se propager pour un couvert végétal inférieur à 30 % [48,49]. Ainsi, une technique communément employée lors de l'aménagement est celle du brûlage dirigé [18,50,51]. Cela consiste à réduire la biomasse végétale afin de minimiser le risque d'incendie au moyen de différentes procédures [52–55]. Par exemple, ces brûlages dirigés peuvent être employés dans la mise en place de coupures de combustible du type ZAL (Zone d'Appui à la Lutte) dans un plan de prévention du risque ou comme moyen de se débarrasser des débris en sous-bois après des élagages. En effet, les territoires abandonnés et donc non-exploités sont les endroits propices à des feux de forte puissance [56]. La désertification des zones rurales, les exodes successifs vers les zones urbanisées et ainsi l'augmentation des WUI, depuis des années, sont autant de facteurs qui laissent à penser que si rien n'est fait pour stopper cette tendance, elle favorisera l'augmentation du risque incendie sur des zones actuellement peu soumises à des feux de forêt.

I.3.3 Influence des conditions climatiques et météorologiques sur le risque d'incendie

Les conditions climatiques et météorologiques sont les facteurs considérés comme primordiaux en ce qui concerne l'activité des feux de forêts [9,10]. La température ambiante, la vitesse du vent, l'humidité relative et les précipitations sont des facteurs influençant fortement la dynamique d'un incendie [57]. Des études montrent que la dimension d'un feu est

reliée directement à la température ambiante [58]. D'autre part, les précipitations qui sont corrélées avec la teneur en eau de la végétation et donc avec l'inflammabilité du combustible ont un rôle prédominant en ce qui concerne l'activité des feux de forêt [59]. Ainsi, il est avancé que le réchauffement climatique avec l'augmentation des températures moyennes et les sécheresses plus fréquentes aboutissent à ce que la saison des incendies soit plus longue pour un grand nombre de régions du globe [48,60] et particulièrement dans le sud de l'Europe [61,62]. Le changement climatique n'affecte pas seulement la teneur en eau des végétations, il influence aussi notablement d'autres caractéristiques comme la charge surfacique, sa structure ou la continuité du couvert végétal sur une parcelle [48,63,64]. Plusieurs études prévoient donc une augmentation du risque feu dans la plupart des régions du globe et particulièrement dans le sud de l'Europe avec une augmentation de la fréquence des feux extrêmes auxquelles ni les sociétés ni les différents écosystèmes sont actuellement adaptés [58,65,66].

I.3.4 Impacts des incendies sur la santé

Les conséquences des incendies de forêt ne se restreignent pas exclusivement à ceux affectant l'économie et l'environnement. En effet, les feux de forêt ont également une incidence sur la santé de l'homme [67–69]. Ces impacts peuvent se faire ressentir à différentes échelles : locale, régionale, nationale et même continentale. Suite à un feu de forêt, la santé d'un être humain peut être affectée de plusieurs manières et à différents moments : (1) par l'exposition directe aux flammes ou aux flux de chaleur provenant de ces dernières, (2) par l'exposition à des particules ou l'inhalation de substances transportés par l'air, (3) par le contact avec des sols contaminés par des substances chimiques et (4) par le contact ou l'absorption d'eau contaminée [70]. Il est à noter que d'autres effets à plus long terme et moins directs ont été également mis en évidence. Ces derniers sont en relation avec des maladies dues au stress ressenti par les personnes ayant eu à vivre de tels évènements [71].

En ce qui concerne les effets liés à la pollution de l'air, une moyenne annuelle de décès entre 260 000 et 600 000 est avancée [72]. La fumée provenant d'un feu de forêt forme un mélange complexe de dioxyde de carbone (CO_2), de particules en suspension, de vapeur d'eau, de monoxyde de carbone (CO), de composés organiques (tels l'acroléine et le formaldéhyde), d'oxydes d'azote (NO_x) et de divers minéraux. Le principal risque encouru par un homme proche d'un front de flammes, hormis celui d'être gravement brulé, est celui d'être intoxiqué par le monoxyde de carbone [73]. C'est ce qui est appelé un impact local. Mais, les particules issues d'un incendie peuvent atteindre également des populations situées à des centaines de kilomètres de ce dernier. C'est l'échelle régionale et parfois nationale. De plus, le panache de fumées émis par un feu extrême affecte directement la qualité de l'air en influant sur la concentration d'autres composants, tels le monoxyde de carbone ou l'ozone dans l'air (O_3), en aval du lieu de l'incendie [75,76]. Un cas plus rare mais qui ne doit pas être négligé est celui où un incendie se propage dans une région contaminée par des substances radioactives, ces particules peuvent être transportées sur de grandes distances, ce qui augmentent le risque sur la santé [77]. Par exemple le feu de forêt qui a eu lieu récemment dans la zone d'exclusion de la centrale nucléaire de Tchernobyl en avril 2020 [78], illustre parfaitement ce risque et les conséquences éventuelles d'un tel incident pour tout le continent européen et surtout la Russie. C'est l'échelle continentale.

La composition des fumées dégagées lors d'un incendie dépend de multiples facteurs dont les principaux sont le type de végétation, les conditions météorologiques et sa dynamique [79]. Ainsi, afin de quantifier l'impact de la qualité de l'air sur la santé, il faut déterminer la composition des fumées émises par chaque type de feu. Le Centre commun de Recherche de la Commission européenne [80] dispose d'un outil opérationnel susceptible de quantifier les émissions provoquées par un incendie sur tout le continent européen. Cet outil est intégré au Système Européen d'Information sur les Incendies de Forêt [81] et est considéré comme l'un

des meilleurs systèmes opérationnels basés sur des cartes de végétations détaillées et fournissant une cartographie représentant l'évolution des feux d'après des images satellites [82].

L'approche théorique qui permet d'évaluer les conséquences des incendies sur la qualité de l'air se basent généralement sur des modèles qui déterminent la quantité des composés émis [83,84]. Cependant, pour des feux de forêt plus puissants comme les feux extrêmes, il est nécessaire de déterminer la distance de transport des particules émises ainsi que les effets de la fumée sur les phénomènes atmosphériques. La modélisation de la distribution spatiale et temporelle des particules en suspension issues des feux est donc fondamentale pour quantifier leurs impacts sur la santé. Des études ont été réalisées pour étudier l'impact des feux sur la santé des pompiers [83] mais très peu ont été menées pour évaluer l'incidence de l'exposition aux particules en suspension issus des feux sur la population. Cascio [85] souligne que la fréquence croissante des incidents des feux extrêmes, l'augmentation des superficies interfaces habitat-forêt, la désertification des zones rurales, la concentration des activités humaines dans des territoires suite à l'exode rural, ajouté à l'augmentation de la population sur la planète et de son vieillissement engendrent un nombre plus important d'individus soumis au risque engendré par l'émission des fumées des feux de forêt. Cascio souligne ainsi la nécessité d'estimer plus rigoureusement les conséquences de l'exposition de la population aux particules en suspension issues des feux de forêts.

Malheureusement, les conséquences sanitaires dues aux feux de forêt sont souvent ignorées lors des estimations des pertes [86]. En effet, l'estimation des coûts d'une catastrophe sous-estime souvent ceux liés aux maladies causées par l'exposition aux fumées ou aux particules émises [87]. En Europe, les coûts médicaux engendrés par des maladies en relation avec les feux de forêts sont généralement ignorés à cause du manque de données exploitables. Par contre, aux États-Unis les conséquences sanitaires suite aux feux de forêts sont pris en considération dans l'étude des coûts globaux des feux de forêt [88].

Une autre conséquence possible liée à la propagation d'un incendie est la contamination de sites. Par exemple, des études réalisées aux États-Unis ont montré que l'eau potable pouvait être contaminée. En effet, grâce à des analyses faites à différents points du réseau de distribution, il a été mis en lumière que des niveaux assez élevés de certains composés organiques volatils (COV) et de benzène étaient supérieurs aux limites acceptables. Le coût total pour décontaminer les réseaux d'eau potable suite aux incendies en Californie en 2017 a été estimé à près de 44 millions de dollars [89].

La prédiction de l'augmentation des coûts sanitaires liés aux feux de forêts de forte puissance est un argument de poids pour adapter des mesures de prévention susceptible de minimiser le nombre de feux extrêmes et ainsi réduire les risques sanitaires en relation avec ces incidents [90].

I.3.5 Techniques utilisées pour diminuer le risque incendie

La probabilité d'occurrence d'un feu de forêt puis sa capacité à se propager n'est jamais nulle [46]. Afin de réduire cette probabilité d'occurrence et de minimiser les dégâts occasionnés par une propagation avec une forte intensité, des politiques de prévention et de lutte doivent être mises en œuvre [91]. Il a été vu précédemment que ce risque est fortement corrélé aux combustibles, aux facteurs d'occurrences naturelles et humaines, et aux conditions météorologiques. Comme les conditions météorologiques et les facteurs d'éclosions naturelles ne peuvent pas être modifiés, il est donc obligatoire d'essayer d'avoir une action positive sur les facteurs liés à l'activité humaine et une autre sur le couvert végétal [48]. Pour nos régions méditerranéennes, les politiques de prévention et de protection contre les feux ont été mises en place depuis les années 60 [40,92]. Ces politiques regroupent l'ensemble des dispositifs à mettre en œuvre afin de réduire le risque des feux de forêts sur l'homme et également sur les milieux naturels.

Au niveau national, la politique de prévention renferme 5 actions principales : (1) la diminution des départs de feux, (2) la surveillance, (3) l'aménagement, (4) la prise en compte du risque dans l'aménagement et finalement (5) l'information préventive. L'action visant à la diminution de la probabilité d'occurrence des incendies agit essentiellement sur l'élimination des imprudences causant un départ involontaire liée aux loisirs, aux travaux en forêts et aux infrastructures mal protégées. Pour cela, trois actions sont mises en œuvre. La première action consiste à informer la population sur les comportements qui augmentent le risque d'incendie au moyen de la formation scolaire, de colloques, de rencontres ou tout autre moyen de communication. Pour la seconde, des enquêtes sont réalisées sur le terrain pour déterminer les points départ des feux. Pour finir, une attention particulière est apportée à la gestion des interfaces forêt-habitat. En second lieu, l'objectif est la surveillance accrue des massifs forestiers afin de détecter au plus tôt le départ d'un feu et agir rapidement. En effet, l'attaque rapide du feu, avant qu'il n'atteigne une puissance rendant la lutte inefficace, réduit la surface totale brulée et donc les dégâts causés. Par exemple, en Croatie, les forestiers utilisent un réseau de caméras de surveillance fixes pour quadriller le territoire [93,94]. Cette action est le plus souvent couplée à une évaluation du niveau de risque journalier qui fait appel à des outils de prédiction météorologiques [95–97]. C'est ce qui est fait, par exemple, en Slovénie où le risque incendie est évalué quotidiennement utilisant le « *Canadian Meteorological Fire Hazard Indicator* » [54,98,99]. De plus, le système slovaque utilise les modèles météorologiques ALADIN [100] et INCA [101] pour calculer le risque incendie trois jours à l'avance. Les résultats sont ensuite accessibles sur un site web qui est en libre accès [102].

En ce qui concerne l'aménagement et la gestion des territoires avec la prise en compte du risque incendie, l'objectif principal est de diminuer la vulnérabilité de la forêt. Cette action se manifeste par la mise en place d'ouvrages et des traitements appropriés du combustible. Un effort est fait principalement pour diminuer la puissance du feu lors d'une propagation en

modifiant la quantité et/ou la continuité et/ou la nature du combustible afin d'éviter des feux extrêmes [103,104]. Il est à noter que ces modifications préventives doivent également avoir une incidence positive sur le nombre total de feux. Parmi les moyens préventifs les plus utilisés on cite : les coupures de combustible et les brûlages dirigés.

Les coupures de combustible ont comme principale fonction de limiter les surfaces parcourues par les feux pour que les opérationnels puissent intervenir et arrêter son évolution [105,106]. La seconde fonction est de créer des zones de sécurité qui assurent une retraite aux opérationnels chargés de la lutte [67,107,108]. La troisième fonction est de sécuriser des zones urbanisées [109,110]. La dernière fonction étant de réduire la probabilité de départ des feux en enlevant de la végétation de part et d'autre des voies de circulation. La Corse est caractérisée par un aménagement spécifique de coupures de combustible appelé Zones d'Appui à la Lutte (ZAL) [108] qui maillent une grande partie de la région.

La finalité des brûlages dirigés est de réduire la quantité de la biomasse inflammable sur une zone bien délimitée. Ils représentent une des techniques les plus efficaces et les moins onéreuses surtout dans les zones difficiles d'accès [50,51]. Ce type de feux peut être utilisé pour plusieurs applications. Un brûlage dirigé peut être utilisé pour la réalisation et ensuite la maintenance des coupures de combustible. Il peut également servir à éliminer de la biomasse très inflammable en sous-bois due aux herbes sèches et aux feuilles ou débris morts provenant des arbres. Son emploi est aussi utile pour préparer le terrain en vue d'une utilisation agricole et il permet également d'ouvrir des territoires à l'abandon [52–55].

Malgré une augmentation des coûts de lutte contre les incendies, beaucoup de pays font face à des feux extrêmes [29]. La prévention du risque feu de forêt est donc une problématique générale rencontrée par de nombreux pays. En 2006, la FAO (Food and Agriculture Organization) des Nations Unis a décrété que "forest fire prevention may be the most cost-effective and efficient mitigation program an agency or community can implement" [111].

Ainsi, la FAO a indiqué au monde entier qu'il était temps de passer à plus de prévention alors que beaucoup de pays misent l'essentiel de leurs efforts sur la lutte.

I.4 La Modélisation : outil pour la réduction du risque incendie

La région méditerranéenne a connu ces dernières années une diminution des superficies brûlées, à l'exception du Portugal, mais il faut noter une augmentation des feux extrêmes provoquant des dégâts importants sur les écosystèmes avec des incidences économiques désastreuses et parfois des pertes humaines. L'estimation du risque incendie s'avère donc être un enjeu majeur pour cette partie du globe et il est maintenant admis qu'il faudra s'adapter à ce nouveau contexte. Il sera donc obligatoire de mettre en place des politiques d'aménagement du territoire intégrant de meilleures pratiques, une plus grande implication des scientifiques auprès des opérationnels et des décideurs ainsi qu'un changement des comportements incluant une meilleure information de la population. Cela passera, de toute évidence, par un transfert des moyens de la lutte vers la prévention [112].

Depuis quelques années maintenant, la communauté scientifique s'attache à modéliser le comportement ainsi que l'impact des feux de forêts. Pour cela, plusieurs approches ont été proposées, chacune ayant des applications bien définies et surtout un domaine de validité et donc d'utilisation [113]. En effet, la prédiction du comportement d'un incendie, de sa vitesse de propagation, de ses caractéristiques géométriques, de son intensité ou de la quantité de chaleur dégagée sont autant d'informations qui peuvent être intégrées dans des outils d'aide à la décision en vue d'aménager un territoire pour réduire le risque incendie [25]. Ces connaissances doivent également donner l'opportunité aux opérationnels de planifier des stratégies pour lutter contre les incendies.

I.4.1 Classifications des modèles : empiriques, semi-physiques, physiques complets et physiques simplifiés

La communauté scientifique a, depuis plus de soixante-dix ans, montré un intérêt certain vis à vis de la problématique des feux de forêt. D'ailleurs, un grand nombre de travaux de recherche traitant de la modélisation des incendies sont disponibles dans la littérature [114–116]. Par exemple, Weber [117] a proposé une classification des modèles décrivant le comportement des feux basée sur le type d'approche utilisée. Il a ainsi scindé les modèles en trois groupes : empiriques, semi-empiriques et physiques complets. Nous passerons ces types de modèles en revue et nous rajouterons un autre groupe qui est celui des modèles physiques simplifiés.

La première approche, est basée sur l'observation de feux expérimentaux et l'utilisation de méthodes statistiques pour traiter les données. Cela n'implique donc pas l'emploi de lois physiques [118]. Ces modèles possèdent des domaines de validité très restreints et doivent être utilisés avec précaution par les opérationnels. Ils ne peuvent être appliquées que pour des configurations semblables ou très proches de celles utilisées pour les obtenir. Les opérationnels doivent être très vigilants en ce qui concerne le type de combustible et l'échelle d'obtention du modèle. Par exemple, un modèle empirique obtenu sur une litière à l'échelle du laboratoire n'est pas forcément pertinent pour caractériser une propagation sur du maquis à l'échelle du terrain.

Les approches semi-empiriques [119] sont basées sur le principe de conservation de chaleur sans différencier entre eux les différents modes de transfert. De plus, ils ne prennent pas en compte les réactions chimiques qui se déroulent pendant la propagation. Ces modèles exigent la présence de certains paramètres déterminés expérimentalement. Un des modèles semi-empiriques le plus connu a été proposé par Rothermel [119]. Il est le plus utilisé par les concepteurs de simulateurs [116]. Par exemple, le modèle de Rothermel est le cœur mathématique de BEHAVE [120].

Les modèles physiques complets [47,121–124] étudient la propagation des feux de forêt en prenant en compte tous ses aspects physiques et chimiques de manière détaillée. La plupart de ces modèles sont basés sur l'approche proposée par Grishin en 1997 [125] et qui prend en compte les propriétés du combustible, les différents processus physicochimiques de la propagation des feux (chauffage, déshydratation, pyrolyse) ainsi que les lois de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement pour les phases solides et gazeuse. Ainsi, ce travail a conduit plusieurs chercheurs à développer des codes de simulations dits complets. Les plus connus sont : WFDS [122], FireStar2D et FireStar3D [47,126] ou FIRETEC [123]. Ces modèles sont essentiellement employés pour comprendre le comportement des feux et servir d'expériences numériques. En effet, ils nécessitent un temps de calcul important, loin du temps réel et sont donc difficilement utilisables en phase opérationnelle.

Les modèles physiques simplifiés permettent de fournir la plupart des caractéristiques d'un front de flammes. Les différentes relations obtenues sont établies à partir d'hypothèses et de bilans physiques simplifiés. Des comparaisons avec un certain nombre de feux permettent de valider les hypothèses simplificatrices ou de les améliorer [127–132]. Le principal avantage de cette approche est un temps de calcul très faible. Ceci les destine donc à une utilisation comme « cœur » d'outil d'aide à la décision et/ou d'aide à l'aménagement du territoire.

I.4.2 Les modèles de végétation

La dynamique d'un incendie dépend de plusieurs facteurs dont l'un des plus important est le couvert végétal. Connaître les caractéristiques de la végétation s'avère donc être un enjeu majeur pour la prédiction du comportement des feux et ainsi pour l'évaluation du risque incendie [133]. D'où l'importance des modèles de combustible aussi bien pour la communauté scientifique que pour les opérationnels. En Italie, des modèles de végétation de type maquis de Sardaigne et utilisables par le simulateur FARSITE ont été développés [134], Au Portugal, une

méthode utilisant la prise de photographies a été proposée pour décrire la complexité de la végétation ensuite utilisable par FARSITE [135]. À l'échelle européenne, une étude a permis de modéliser différentes végétations de la forêt en Grèce [136]. Les parties ci-dessous, passent en revue les principales caractéristiques de ces modèles de végétation.

I.4.2.1 Modèles à l'échelle du terrain

À l'échelle du terrain la caractérisation de la végétation et donc la conception de modèles est essentiellement réalisée pour la création des cartographies du couvert végétal [116]. La méthodologie adoptée est souvent le résultat d'un compromis entre la nécessité de représenter des informations suffisamment précises et l'obtention de ces informations à l'échelle souhaitée. Parmi toutes les classifications disponibles, celle proposée par Sandberg *et al.* [137] est l'une de celles qui catégorisent le combustible de la manière la plus complète et également la plus flexible. En effet, la plupart des approches mettent l'accent sur la végétation présente à la surface du sol [119] mais l'approche proposée par Sandberg *et al.* prend aussi en compte les différents strates du combustible du niveau du sol jusqu'à la canopée. Ce modèle décrit ainsi six strates : sol, litière, combustible ligneux, végétation basse, maquis et canopée.

En ce qui concerne les échelles spatiales, Keane *et al.* [138] en ont identifié trois : la grande échelle (nationale ou mondiale), l'échelle moyenne (régionale) et la petite échelle (locale). Chaque échelle est dédiée à une application différente. Ainsi, la grande échelle aide à la planification et à l'allocation des ressources, l'échelle moyenne est utilisée pour l'aménagement du territoire et pour la planification des techniques de lutte contre les incendies. Pour finir, les modèles de végétation à petite échelle sont utilisés comme intrants des modèles de prédiction du comportement du feu. Pour les grandes échelles les modèles donnent une idée sur le type de couvert végétal mais donnent sa distribution spatiale de manière peu précise. Par conséquent, pour des applications à des échelles plus petites, il est obligatoire d'ajouter un

modèle qui décrit la structure du combustible de manière plus détaillée. À l'échelle locale, les modèles de combustible doivent impérativement fournir des informations sur les paramètres physico-chimiques du combustible pour la simulation numérique avec des outils comme FARSITE [139].

I.4.2.2 Typologie de la végétation

C'est l'organisation des différentes strates du combustible ainsi que des particules au sein de ces strates qui caractérise la typologie. Certains modèles de végétation sont très simples et ne prennent en compte que des valeurs moyennes ou équivalentes du combustible. Ainsi, même pour une végétation hétérogène, c'est à dire composée de plusieurs espèces et plusieurs strates, une valeur moyenne sera donnée pour chaque paramètre conduisant à un modèle de combustible équivalent à une seule espèce et une seule strate. C'est le cas des modèles de végétation utilisés par le modèle physique simplifié de l'université de Corse [128] ou le modèle de Rothermel [119]. Par contre, pour des modèles complets de comportement des incendies, ce type de modèle de combustible n'est pas suffisant. La prise en compte des différentes strates et les caractéristiques des espèces au sein de ces strates est nécessaire. Par exemple, Cohen *et al.* [140] ont proposé une approche décrivant dans le détail les combustibles de type maquis et répondant aux besoins d'un modèle physique complet prédisant la dynamique d'un feu à l'aide d'une approche multiphasique [47]. Ce modèle de comportement du feu exige une distribution spatiale des différentes familles de combustibles selon une grille de dimension déterminée. De plus, il nécessite la fraction volumique pour chaque famille de combustibles ainsi que sa charge surfacique, son épaisseur, sa teneur en eau, sa continuité car toutes ces caractéristiques influent sur la dynamique de l'incendie et donc son intensité.

I.4.2.3 Prise en compte des propriétés physico-chimiques

Les particules sont les éléments les plus petits que l'on considère pour étudier la structure de la végétation. Ces derniers appartiennent aux différents éléments du combustible : branches, feuilles, écorces, aiguilles. Les caractéristiques des particules sont des données indispensables pour les modèles physiques ou semi-empiriques de comportement du feu. Les propriétés physiques, chimiques et thermiques des particules de combustible peuvent être évaluées à l'échelle de la particule elle-même ou à l'échelle d'un élément constituant le combustible (feuille, rameau, branche, tige, etc.), ou même à l'échelle de plusieurs particules appartenant à la même famille d'éléments. Les particules de combustible sont normalement réparties par classes de taille ou selon leur état, c'est à dire, vivantes ou mortes [140]. Il est à noter que cette classification n'est pas standardisée autour de la planète et qu'en Europe les combustibles fins sont habituellement divisés en deux classes.

Pour chaque classe de particule, les caractéristiques suivantes sont nécessaires :

- Physiques (mesurées) : longueur, largeur, épaisseur, diamètre de la particule, masse, volume ;
- Physiques (calculées) : rapports masse / volume et rapport surface / volume, fraction volumique ;
- Chimiques : teneur en en eau et composants chimiques ;
- Thermiques : enthalpie de combustion et pouvoir calorifique.

I.5 Apport du travail effectué

Depuis le 29 juin 2012, les dispositions législatives spécifiques à la Défense de la Forêt Contre les Incendies (D.F.C.I.) sont regroupées dans le Code forestier. Chaque préfet de département doit définir certaines modalités d'application du code selon la nature des risques. De plus, le Code forestier (art. L. 133-2 et R. 133-1 du C.F.) prévoit l'élaboration des Plans de

Protection des Forêts Contre les Incendies (P.P.F.C.I.). La Corse, étant considérée comme un massif forestier unique au sens du Code forestier, a également intégré la protection des espaces naturels et a donc élaboré un Plan de Protection des Forêts et des Espaces Naturels contre les Incendies (P.P.F.E.N.I.). Ce document n'est pas un document juridique opposable mais fixe des orientations et un plan d'action. Une action retenue est la mise en œuvre « d'aménagements et équipements » afin de prévenir les incendies et en limiter leurs conséquences. Il s'agit en particulier des ouvrages spécifiques à la Corse que sont les Zones d'Appui à la Lutte (Z.A.L.) (PPFENI 2013-2022). Ces coupures de combustible représentent pour les collectivités locales un investissement conséquent et doivent s'accompagner d'un effort d'entretien régulier et onéreux. Dans cette optique, les brûlages dirigés s'avèrent être un moyen efficace d'entretenir de tels espaces à moindre coût ; surtout dans des zones difficiles d'accès. Ces brûlages dirigés s'effectuent également pour des raisons de sécurité dans des conditions bien spécifiques et sont décrits comme étant des feux marginaux.

Par définition, les feux marginaux sont les feux qui sont susceptibles de cesser de se propager suite à une faible variation des conditions liées au combustible, à la pente du terrain ou à la météorologie [53]. Wilson [19] a montré que l'extinction d'un feu est corrélée à la balance entre l'énergie dégagée par ce dernier et l'énergie nécessaire pour la continuité de sa propagation. Les feux marginaux peuvent être divisés en deux catégories. La première renferme les feux qui se propagent sous condition d'un vent faible, à contrevent ou contrepente. La seconde représente les feux qui se propagent dans une direction parallèle à celle d'un vent. Cette seconde catégorie de feux marginaux est recommandée si et seulement si le combustible est de faible charge surfacique ou bien s'il possède une teneur en eau considérablement élevée. La littérature montre plusieurs critères d'extinction reliés aux caractéristiques du couvert végétal, soit à sa teneur en eau [19,141], soit à sa continuité, sa charge surfacique et sa structure [48,141–143]. La communauté scientifique s'intéresse de plus en plus à l'étude des feux marginaux en

raison de l'importance de leurs applications sur le terrain et en particulier lors de la mise en place de campagnes de brûlages dirigés [54].

I.5.1 Importance de l'étude des feux marginaux et des critères de non propagation

La modélisation de la propagation d'un feu de surface dans le cas particulier d'un vent nul et sans pente a été traitée dans plusieurs travaux de recherche [144–147]. La plupart de ces études utilisent une approche empirique et se bornent à fournir une expression de la vitesse de propagation à plat sans vent. En effet, cette vitesse de propagation sous vent nul et sans pente est souvent utilisée par d'autres modèles empiriques ou semi-physiques sous d'autres conditions. Par exemple, c'est un paramètre du très répandu modèle de Rothermel [119] permettant de calculer la vitesse de propagation d'un feu de surface avec un vent non nul et en pente. De plus, certains travaux affirment que la vitesse d'un feu à plat sans vent peut servir à estimer correctement la vitesse d'une propagation dans le sens contraire du vent ou à contre-pente [148,149].

Pour mener des brûlages dirigés en toute sécurité les opérationnels sont donc tentés de choisir des conditions pour lesquelles les propagations sont celles qui engendreront des feux marginaux. Comme nous l'avons vu précédemment, les brûlages dirigés ont des applications importantes dans la gestion du risque car ils permettent une réduction du combustible à moindre coût et en toute sécurité. Ils sont d'ailleurs la norme lorsque les opérationnels mènent des campagnes de brûlages dirigés. Cependant, il faut quand même mentionner qu'il existe un autre type de brûlages dirigés : ceux menés avec des vitesses de vent plus élevées et donc se propageant avec une intensité plus élevée [150]. Ces derniers doivent impérativement être conduits lorsque la teneur en eau ou de la charge surfacique du combustible sont proches des valeurs qui entraînent l'extinction du feu [151]. La détermination des caractéristiques du

combustible qui influencent fortement la propagation ou non d'un brûlage dirigé avec ou sans vent est ainsi primordiale pour les opérationnels. Pour cela, l'approfondissement de la compréhension des phénomènes qui influent sur le comportement des feux s'avère une nécessité puisque la propagation des brûlages dirigés dépend de nombreux facteurs, qui peuvent agir sur la réussite ou non de cette technique. Ces facteurs sont nombreux mais la charge surfacique de la végétation, sa teneur en eau et les conditions météorologiques ont été identifiées comme jouant un rôle déterminant [17,143,150].

Les modèles utilisés pour la prédiction de la réussite des feux marginaux sont souvent des modèles empiriques basés sur des études statistiques de données expérimentales. Par exemple, celui proposé par Wilson [19] ou bien celui avancé par Marsden-Smedley et Catchpole [152]. Ces approches donnent des résultats satisfaisants mais pour des cas très proches des conditions expérimentales qui ont permis les études statistiques. L'approche proposée dans ce travail consiste à rechercher des critères de non propagation obtenus avec des modèles physiques et donc applicables dans nos régions méditerranéennes et plus précisément pour des végétations présentes en Corse. Ces critères permettront aux opérationnels de choisir les conditions optimales qui garantissent la réussite d'un brûlage dirigé en toute sécurité.

I.5.2 La technique du brûlage dirigé

Il est communément admis qu'un feu de forêt est piloté par trois facteurs principaux : la topographie du terrain, les conditions météorologiques et le couvert végétal [153]. C'est ce qui est appelé le triangle du feu lié à l'environnement (Figure 1.5).

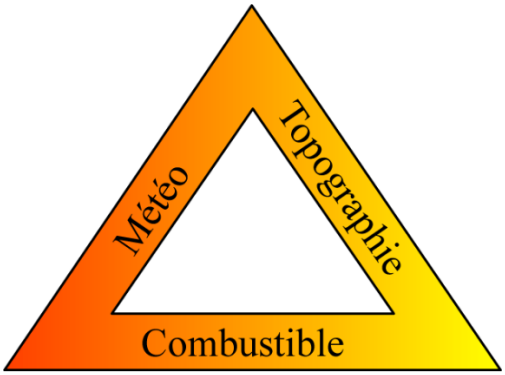


Figure 1.5 *Triangle du feu lié à l'environnement.*

Parmi tous ces trois facteurs, le seul facteur qui peut être modifié afin de réduire le risque incendie est la quantité du combustible mais également sa répartition sur un domaine donné. La technique du brûlage dirigé est ainsi couramment appliquée afin de réduire cette biomasse [54]. Ces brûlages dirigés sont des feux de surface qui se propagent dans une strate basse constituée de végétaux de petite taille comme les herbes mais également des matières végétales mortes au sol comme les feuilles mortes.

Il est maintenant admis que même les hommes préhistoriques ont utilisés des feux de surface afin d'ouvrir des voies d'accès dans des territoires où la densité de la végétation rendait l'action de chasse difficile. Depuis l'antiquité, les brûlages dirigés sont un outil précieux utilisé par les hommes pour aménager le territoire [151]. Même avec les progrès technologiques, cette technique s'avère rester incontournable surtout dans les régions difficiles d'accès. Par exemple, aux USA les forestiers ont commencé à utiliser la technique des brûlages dirigés comme outil de réduction du risque d'incendie dès 1907 [52,151]. Cette méthode consiste à déclencher des feux qui se propagent avec une faible intensité, ce qui permet de réduire la charge du combustible en brûlant essentiellement les particules les plus fines et en garantissant une sécurité maximale [106,154]. Les brûlages dirigés sont également utilisés pour entretenir certains ouvrages mis en place sur le territoire pour casser la dynamique d'un éventuel feu. Ces

coupures de combustible sont les fameux « fuelbreaks[2] » et les Zones d'Appui à la Lutte (ZAL) en Corse [25,92,155].

D'autres utilisations des brûlages dirigés peuvent être mentionnées comme, par exemple, l'ouverture des territoires à des fins agricoles ou l'élimination des rameaux et du feuillage infectés par certaines maladies sans abîmer les bourgeons terminaux. Le terme pour qualifier ces brûlages dirigés réalisés par les éleveurs, que ce soit en Lozère, en Corse ou dans les Pyrénées, est celui d'écobuage. C'est aussi le terme employé dans les documents administratifs [156].

Plusieurs techniques existent et ce sont les conditions météorologiques, la topographie du terrain et le type de couvert végétal qui détermine le choix pour un brûlage optimal et sécurisé.

Il est possible d'identifier quatre techniques [51] : (1) à contrevent ou contrepente, (2) montant ou direct, (3) en escalier et (4) en peigne (Figure 1.6). Il est important de noter qu'il est recommandé d'effectuer au préalable un feu à contrevent ou contrepente pour sécuriser les lieux avant toute autre technique [52,151].

[2] Terme anglo-saxon communément utilisé par la communauté scientifique

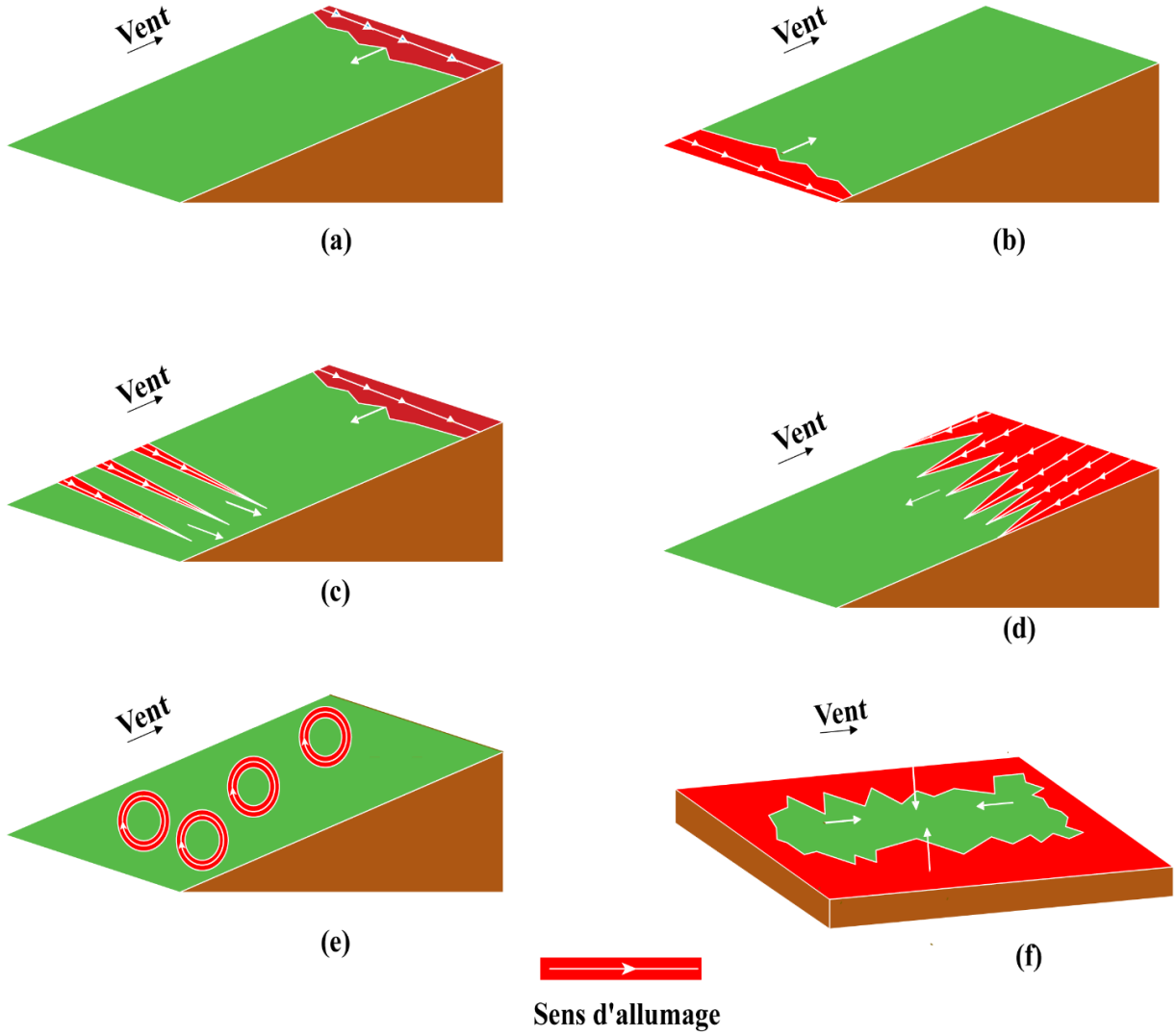


Figure 1.6 *Principales techniques de feux dirigés.*

I.5.2.1 Technique du brûlage à contrevent ou contre-pente

Le feu est souvent allumé le long d'une coupure de combustible, où il se propage selon une direction opposée à celle du vent ou de la pente (Figure 1.6 (a)). Cette technique nécessite une intensité et une direction stables du vent. Ces feux sont considérés comme contrôlables et sûrs car il est admis que de faibles fluctuations de l'intensité du vent n'influencent que très peu la vitesse de propagation du feu [157,158] ; de plus elle permet un brûlage complet et en même temps à faible intensité, et ainsi des conséquences réduites sur le sol. Le principal inconvénient de cette technique provient du fait que les conditions sous lesquelles cette technique est menée

rendent la propagation relativement lente. Par conséquent le temps de mise en œuvre est long [150].

I.5.2.2 Technique du brûlage montant ou direct

Afin de diminuer le temps de brûlage, les opérationnels optent parfois pour la technique du brûlage montant ou direct (Figure 1.6 (b)). Cette technique est recommandée si le terrain est caractérisé par une teneur en eau élevée ou une faible charge surfacique du combustible. La vitesse de propagation du feu est plus rapide que pour la technique du brûlage à contrevent ou contrepente, ce qui a également comme effet de réduire l'impact du feu sur le sol. Le problème majeur de cette technique est qu'en cas d'une faible augmentation de la vitesse du vent ou de la teneur en eau du combustible, la propagation peut vite devenir hors de contrôle [52].

I.5.2.3 Technique du brûlage par lignes simultanées

La technique du brulage en peigne consiste à déclencher plusieurs lignes de feu latéraux en même temps (Figure 1.6 (c)). Cette technique permet d'obtenir des propagations à 90° par rapport à la direction du vent. Elle est utilisée pour sécuriser les opérations lors de brûlages en escalier ou à contrevent au fur et à mesure de leur propagation. Parfois, les opérationnels l'utilisent pour compléter un feu à contrevent dans des zones caractérisées par un combustible à faible charge surfacique ou lorsque le taux d'humidité de l'air est plus élevé dans le but de réduire le temps de traitement.

I.5.2.4 Technique du brûlage en escalier

Cette technique associe les deux techniques décrites précédemment, le brûlage à contrevent et le brûlage direct. Dans un premier temps, un brûlage à contrevent ou contrepente est nécessaire pour assurer la sécurité de l'opération. Ensuite, plusieurs lignes de feux sont

déclenchées parallèlement à la direction du vent (Figure 1.6 (d)). La distance entre les lignes de feu dépend de la hauteur de la flamme et aussi de l'intensité de feu souhaitée. Les avantages de cette méthode sont la réduction du temps de traitement et l'obtention d'un brûlage complet.

I.5.2.5 Technique du brûlage en peigne

Les opérationnels optent également pour une variante de cette technique, lorsque le combustible est plus sec et donc l'intensité des lignes de feux susceptible d'être plus élevée. Cette technique consiste à créer des lignes de mise à feu discrète grâce à des allumages ponctuels (Figure 1.6 (e)). Cette variante appelée technique de brûlage pied à pied permet d'avoir des propagations avec une intensité supérieure à celle d'un feu à contrevent mais inférieure à celle d'un feu direct. Elle est également utilisée lorsque le couvert du combustible n'est pas continu.

I.5.2.6 Technique du brûlage à feu périmétral

Cette technique est utilisée pour les terrains à pente nulle (Figure 1.6 (f)). Elle permet de réduire le temps de traitement et en plus la mise en œuvre de ce procédé est facile. Par contre, cette technique produit un feu assez puissant, ainsi elle ne peut être appliquée que pour des conditions de vent très faibles.

I.6 Approche utilisée et plan du mémoire

La technique du brûlage dirigé représente sans conteste une technique très efficace, économique et performante pour la gestion et l'aménagement des territoires difficiles d'accès comme en Corse. Ces feux sont habituellement menés sous des conditions marginales. Les opérationnels doivent ainsi s'assurer du succès de la propagation tout en veillant à ce que ce brûlage reste maîtrisé. L'objectif de ce travail est de donner les informations nécessaires aux opérationnels leur indiquant les conditions assurant la réussite de leurs opérations en toute sécurité.

Le second chapitre présente les différentes approches théoriques utilisées dans ce travail. Dans un premier temps, le modèle semi-physique de comportement d'un feu de surface ainsi que la formule analytique pour le critère d'extinction en fonction de la teneur en eau de la végétation sont exposés. La formule analytique et le modèle de propagation sont tous deux développés au sein du projet « Feux » de l'université de Corse. Un critère d'extinction basé sur une approche empirique proposé par Wilson [19] est ensuite présenté et une confrontation des deux approches est également effectuée.

Le troisième chapitre présente la partie expérimentale menée au sein du laboratoire de l'Université de Corse. Les propagations ont été effectuées à plat et sans vent. Ces différents tests ont ainsi permis, dans un premier temps, de vérifier l'influence de la teneur en eau sur la dynamique du feu, puis de confronter les résultats à ceux obtenus théoriquement et en dernier lieu d'étudier l'influence de la charge surfacique du combustible sur le seuil d'extinction lié à la teneur en eau de la végétation.

Le quatrième chapitre est ensuite consacré au modèle multiphasique complet qui est « FireStar2D ». Ce code est utilisé pour effectuer des tests numériques à plat et sous des conditions de vent à différentes échelles. Une confrontation des résultats avec l'approche semi-physique est présentée pour le cas du vent nul. Des simulations réalisées à plat sous des

conditions de vents plus forts sont aussi étudiées afin de montrer l'évolution du seuil d'extinction liée à la teneur en eau du couvert végétal avec ce vent.

Le cinquième chapitre est dédié à la discussion des résultats obtenus à plat et avec un vent faible ou nul, à différentes échelles et pour des combustibles homogènes et hétérogènes.

Le sixième chapitre étudie le seuil d'extinction pour des vents plus forts, à différentes échelles et pour des combustibles homogènes et hétérogènes.

Enfin, le dernier chapitre présente les conclusions de ce mémoire et les perspectives envisagées.

Chapitre II. Détermination de la teneur en eau du combustible conduisant à l'extinction du feu

II.1 La teneur en eau de la végétation

La teneur en eau de la végétation (*m*) est définie comme le rapport entre la masse d'eau contenue dans le combustible et sa masse sèche [159]. Elle est liée principalement à quatre facteurs : la température ambiante, l'humidité relative de l'air ambiant (*RH*), la nature du sol et la date des dernières précipitations [153]. Ainsi, la variation du comportement de *m* en fonction de l'humidité relative suit deux tendances suivant deux intervalles de *RH* : (1) pour des valeurs de *RH* relativement faibles, la relation qui lie *m* à *RH* est quasiment linéaire. Dans ce cas, pour différentes températures ambiantes, les représentations de *m* (*RH*) sont des droites parallèles [160]. Cependant, une étude réalisée avec des litières d'*Eucalyptus* montre un comportement non linéaire de *m* pour des valeurs de *RH* plus grandes [161]. La teneur en eau du combustible est également fortement corrélée au type de végétation, à sa taille, et à son orientation [162,163]. La teneur en eau du combustible varie donc entre les différentes espèces de végétaux mais aussi

entre les différentes parties constituant la végétation elle-même (feuilles, tiges…). En outre, pour une même famille, elle varie dans un cadre spatio-temporel, et selon les différentes saisons. Par exemple, la teneur en eau déterminée pour les prairies dans le bassin méditerranéen est susceptible de varier entre 30 et 100 % [46] ; en Amérique du sud, elle peut varier entre 43 à 200 % [164]; tandis qu'en Afrique cette plage est moins étendue, 28 et 88 % [165].

La teneur en eau du combustible peut être considérée comme un moyen de distinction entre combustible vivant et combustible mort. Normalement, la teneur en eau d'un combustible vivant est beaucoup plus élevée que celle d'un combustible mort. En effet, lorsque la teneur en eau a une valeur inférieure à 30 %, le combustible est considéré comme mort [166]. Elle varie également fortement en fonction des saisons. Elle atteint ses valeurs les plus basses pendant les périodes les plus sèches [162]. Par exemple, Chuvieco *et al*. [46] estiment que pour le maquis méditerranéen les valeurs minimales de la teneur en eau vivante (LFMC[3]) sont comprises entre 45 et 60 %. D'autres études donnent une LFMC minimale d'environ 70 % [164], 80 % [167] ou même 90 % [168]. Il est à noter, qu'à de telles valeurs, la plupart des plantes perdent leurs feuilles. Par rapport aux arbustes, les valeurs minimales de LFMC varient entre 80 à 100 % [169].

II.2 Teneur en eau de la végétation et comportement des feux

Plusieurs auteurs de la littérature ont démontré que la teneur en eau de la végétation est fortement corrélée au comportement des feux de forêt [18,114,144,170]. Les principales grandeurs caractéristiques d'un feu de forêt pouvant notablement varier en fonction de la quantité d'eau de la végétation sont : le taux de combustion, le temps d'ignition du combustible, la vitesse de propagation de l'incendie, la quantité d'énergie libérée. De plus, des études montrent que la teneur en eau du combustible influe sur les activités des feux de forêt

[3] Live Fuel Moisture Content

[143,144,171,172]. Par exemple, une étude [45] montre que les feux extrêmes, c'est à dire des feux ayant parcouru de grandes superficies avec une forte intensité, ont lieu dans des végétations du type chaparral lorsque la LFMC des végétaux est inférieure à 77 %. Une autre étude réalisée en Espagne met en lumière que le risque lié aux feux de prairies pouvant inclure des arbustes augmentent lorsque la teneur en eau du combustible passe sous des valeurs de 40 et 100 % [173]. Ainsi, la teneur en eau de la végétation contribue à l'amortissement du taux de combustion en jouant le rôle du dissipateur de chaleur. Son effet est souvent modélisé à l'aide du rapport de la vitesse de propagation pour une *m* donnée et de celle pour une *m* nulle [18]:

$$[26]: \frac{ROS}{ROS(0)} = \frac{1200}{1200+113\times m-25{,}5\times m^2+2{,}35m^3} \quad (2.1)$$

$$[174]: \frac{ROS}{ROS(0)} = \exp(-0.0707 \times m) \quad (2.2)$$

$$[152]: \frac{ROS}{ROS(0)} = \exp(-0.0243 \times m) \quad (2.3)$$

où ROS[4] est la vitesse de propagation observée pour une *m* déterminée et ROS(0) celle observée lorsque *m* vaut 0 %. D'autre études ont suggéré que la relation exponentielle est valide pour des valeurs relativement faibles de *m* (inférieures à 12 %) et ont montré que la relation tend vers une décroissance linéaire pour des teneurs en eau relativement plus élevées [170].

Nelson [168] a identifié trois influences de la teneur en eau de la végétation sur le taux de combustion.

Premièrement, la teneur en eau a pour conséquence la diminution du taux de combustion par unité de surface brûlée du fait de la diminution de la masse de combustible brûlé et aussi l'augmentation du temps de combustion des particules ce qui engendre une augmentation du temps de résidence de la flamme. En outre, une teneur en eau élevée augmente le temps d'ignition [175] car elle augmente le temps nécessaire pour que la température du combustible atteigne 100 °C (évaporation adiabatique) et donc du temps de préchauffage du combustible

[4] Rate Of Spread en anglais. Communément utilisé par la communauté travaillant sur les feux de forêt.

devant le front de flammes. En effet, des études réalisées par Albini et Reinhardt [176] montrent que l'augmentation du temps d'ignition est dû à l'augmentation de la conductivité thermique et la capacité calorifique du combustible lorsque *m* augmente.

La deuxième conséquence de *m* sur le taux de combustion est la réduction de la quantité du combustible consommée. En effet, la charge du combustible disponible pendant la combustion dépend de la teneur en eau, des fractions de masse des produits volatiles, des suies ainsi que de la température de flamme. Or, la présence d'une grande quantité d'eau dans la végétation cause une diminution de la température de flamme. Une partie de l'énergie dégagée par la combustion est ainsi perdue par la déshydratation du combustible. Un autre phénomène qui doit être considéré est celui de la dilution de l'oxygène de l'air due à la présence de vapeur d'eau dans la zone de combustion [177]. Pompe et Vines [163] ont trouvé que la présence de l'eau cause la formation des fumées, la réduction du taux de l'augmentation de la température des fumées aspirées par le calorimètre ce qui entraîne une combustion moins puissante. Une autre étude montre que l'émissivité de la flamme diminue avec l'augmentation de *m* [178]. Cela peut s'expliquer par la présence de la vapeur d'eau qui induit une diminution de la concentration des suies. Par contre, il y a une augmentation de la concentration du monoxyde de carbone du fait de la réaction entre la vapeur d'eau et le carbone (suies) qui en se combinant forment du monoxyde de carbone et de l'hydrogène. Ceci a pour conséquence de diminuer les transferts radiatifs entre la flamme et le combustible imbrûlé.

Le troisième effet de la teneur en eau du combustible sur le taux de combustion est l'augmentation du temps de résidence de la flamme. En effet, l'augmentation de la teneur en eau augmente la durée totale de combustion des particules à cause de la diminution des échanges radiatifs entre la flamme et les particules. En effet une quantité d'énergie dégagée par la combustion est dissipée pour déshydrater les particules ce qui allonge le temps nécessaire des phases de préchauffage et d'ignition.

II.2.1 Seuil de la teneur en eau correspondant à l'extinction du feu

La teneur en eau de la végétation qui engendre l'extinction d'un feu (m_x) a été définie pour la première fois par Rothermel en 1972 [119]. C'est le seuil de cette teneur en eau au-dessus duquel un feu de surface perd sa capacité à se propager. Dans sa publication [119], il a démontré que, pour des aiguilles de *Pinus ponderosa*, m_x est de l'ordre de 30 %, tandis que pour les combustibles forestiers m_x varie entre 10 et 40 %. Pour les prairies, la teneur en eau d'extinction varie entre 20 et 25 % [18]. Albini [179] a montré que les parties vivantes d'une végétation ayant une teneur en eau moyenne d'environ 100 % possèdent une probabilité de brûlage inférieure à celle des parties mortes ayant une teneur en eau plus proche du point de saturation de leurs fibres (30 %). Pompe et Vines [163] ont montré que les feuilles sèches ont des difficultés à s'enflammer pour une teneur en eau supérieure à 50 %. Une autre étude [180] a estimé que le seuil d'extinction m_x pour les maquis méditerranéens est d'environ 32 %. Cette disparité de données montre que la structure de la végétation et la manière dont l'eau est stockée dans le combustible affecte fortement le seuil d'extinction m_x et plus globalement la dynamique des feux [26,181].

Les modèles qui permettent de déterminer la teneur en eau au-dessus de laquelle un feu de surface a peu de chance de se propager sont peu nombreux. Un des plus connus est celui proposé par Wilson [19]. Ce dernier relie la teneur en eau d'extinction des feux directement à la structure du combustible au moyen d'une formule obtenue à l'aide d'expériences à l'échelle du laboratoire. Cependant, ce modèle empirique possède un domaine de validité très restreint. En effet, son emploi se doit d'être limité aux végétations et aux conditions expérimentales utilisées pour le concevoir. Les modèles utilisés pour la détermination des conditions optimales conduisant à la réussite des feux marginaux sont souvent des fonctions de probabilités basées sur des données expérimentales. Par exemple, des études [181,182] ont démontré que la formule empirique de Wilson surestime le seuil d'extinction pour des végétations de type maquis. Un

modèle alternatif [181] a alors été proposé qui dépend de la vitesse du vent *U*, de la charge surfacique du combustible σ, de la teneur en eau du combustible *m* et de la pente du terrain α. Le modèle est représenté par les relations (2.4a) et (2.4b) :

$$X\hat{\theta} = 1{,}65 + 2{,}99U + 0{,}1\alpha + 2{,}03\sigma - 12{,}55\, m \qquad (2.4a)$$

$$P_b = \frac{exp(X\hat{\theta})}{1+exp(X\hat{\theta})} \qquad (2.4b)$$

Une autre étude [183] réalisée avec des combustibles typiques des forêts boréales mixtes montre que le modèle de Wilson est adapté pour les fibres de bois mais ne convient pas pour ce type de combustibles forestiers. Les auteurs ont élaboré un modèle spécifique aux combustibles forestiers. Ce modèle permet de déterminer la réussite ou non d'une propagation en fonction de la chaleur totale nécessaire pour la propagation du feu, la chaleur de combustion, l'épaisseur du lit du combustible, le rapport surface volume ainsi que la fraction volumique. Ils ont également mis en évidence que les deux derniers paramètres cités sont les moins signifiants.

Ainsi, un indice d'extinction a été proposé :

$$N_x = \frac{\Delta H_g{}^j s\beta^k e^l}{Q_T^f} \qquad (2.5)$$

où ΔH_g est la chaleur de combustion des gaz de pyrolyse, *s* le rapport surface volume, β la fraction volumique, *e* l'épaisseur du lit du combustible, Q_T est la quantité d'énergie nécessaire pour la propagation du feu, et *j*, *k*, *l* et *f* sont des paramètres. Ces paramètres doivent être déterminés grâce à une régression logarithmique de l'équation (2.3).

$$P_0 = \frac{1}{1+exp(\,-j(ln(\Delta H_g)+k\ ln(s\beta)+l\ ln(e)+m\ ln(Q_T))} \qquad (2.6)$$

Marsden-Smedley et Catchpole [184,185] ont développé un modèle pour un combustible de type prairie (*Tasmanian buttongrass moorland*). Ils ont montré que la probabilité de réussite d'un feu de surface dépend dans ce cas particulier de l'intensité du vent

à 1,7 m d'altitude ($U_{1,7}$), de la teneur en eau des particules mortes (m_d) du combustible et de la productivité du terrain (p_s). La productivité du terrain dépend de la géologie du terrain. Les sites étudiés étaient classés entre sites à productivité faible et sites à productivité moyenne. En effet, les sites constitués par la « *quartzite* » (type de roche) sont considérés à faible productivité.

$$P_b = \frac{1}{1+exp(-1+0{,}68\,U_{1.7}-0{,}07\,m_d-0{,}006\,m_d\,U_{1.7}+2{,}1\,p_s)} \qquad (2.7)$$

Les auteurs de cette étude ont déduit que l'extinction du feu est indépendante de l'épaisseur du lit de combustible.

Bradshaw *et al*. [186] ont proposé une formule analytique (2.8) afin de quantifier la teneur en eau d'extinction de la partie vivante du combustible m_{xl}.

$$m_{xl} = 290\left(\frac{1-f_l}{f_l}\right)\left(1-\frac{m_d}{m_{xd}}\right)-22{,}6 \qquad (2.8)$$

où, f_l est la fraction de la partie vivante du combustible, m_d la teneur en eau de la partie morte du combustible, et m_{xd} est sa teneur en eau d'extinction. Il faut noter que m_{xd} est souvent fixée à 30 % [187] . Cette formule analytique est utilisée par le « *US National Fire Danger Rating System (NFDRS)* ».

En 2014, Balbi *et al*. [141] ont établi deux critères de non propagation des feux dans le cas particulier d'une propagation d'un feu de surface à plat sans vent. Le premier critère porte sur la teneur en eau du combustible et le second est lié à la surface foliaire de ce dernier. Deux formules analytiques ont été obtenues à partir d'un modèle physique simplifié modélisant le comportement des feux de surface [131,188] qui peuvent être appliqués pour toutes les familles de combustibles si un modèle équivalent de végétation est disponible [133]. Un modèle équivalent de végétation fournit des caractéristiques moyennes d'une végétation hétérogène.

Dans ce chapitre, les principales étapes amenant à la détermination de la formule analytique permettant de déterminer la teneur en eau d'extinction du feu proposée par Balbi *et al*. en 2014 [141]sont présentées. Une étude de sensibilité de cette formule est ensuite effectuée.

La méthode ayant permis de déterminer la formule empirique de Wilson est également présentée afin de montrer le domaine d'utilisation de cette dernière. Pour finir, le modèle proposé par Balbi *et al*. est confronté à des données expérimentales tirées de la littérature.

II.3 Modélisation physique simplifiée

De nombreux outils opérationnels qui simulent la propagation des feux sont basés sur des modèles empiriques ou semi-empiriques [116]. Aux États unis, le simulateur BEHAVE [120] est basé sur le modèle semi-empirique de Rothermel [119]. En Australie, les opérationnels utilisent le modèle empirique de Mc Arthur [118] pour prédire la propagation des feux dans des prairies (feux d'herbes). Ces modèles sont très efficaces pour prédire le comportement d'un feu dans des conditions environnementales et pour des combustibles très similaires à ceux des conditions de leur détermination. Toutefois, leur utilisation dans un cadre plus large peut engendrer des résultats erronés et délicats à utiliser dans le cadre d'une politique de réduction du risque feu par exemple. L'objectif de cette étude est donc de disposer de modèles qui puissent être le cœur de simulateurs opérationnels capables de fournir des résultats robustes quelles que soient les conditions environnementales ou topographiques et pour les principales végétations présentes en Corse.

En 2007, les chercheurs de l'équipe feux de l'Université de Corse ont proposé un modèle de comportement du feu basé sur une approche physique simplifiée [131]. Ce modèle a été développé dans le but assumé de pouvoir être intégré dans des simulateurs de feux de surface après avoir été testé à différentes échelles. Il satisfait donc deux exigences contradictoires : être suffisamment complet et assez simple. Pour cela, le modèle prend en compte des équations simplifiées qui gouvernent la propagation d'un feu pour permettre de fournir, plus vite que le temps réel, une prédiction des principales grandeurs caractéristiques de son comportement. Ainsi, il fournit la vitesse de propagation en chaque point du front de flammes ainsi que d'autres

caractéristiques de ce dernier comme, par exemple, sa température, son émissivité ou ses caractéristiques géométriques [188]. Cette approche permet de distinguer les différents modes de transferts thermiques mais ne prend pas en compte les aspects chimiques de la combustion. La première version du modèle ne prenait en considération que les transferts radiatifs et faisait appel à des paramètres universels. Le modèle physique simplifié a depuis subi plusieurs améliorations dans le but de fournir des résultats plus robustes en incorporant l'influence de la convection et surtout pour le rendre totalement prédictif en éliminant tous les paramètres de modèle non universels [127–130,132,141,189,190]. En 2014, une étude du cas particulier de la propagation à plat sans vent a proposé un critère de non-propagation des feux basé sur la teneur en eau de la végétation [141]. Ce chapitre présente les principales étapes ayant permis d'obtenir ce critère.

II.3.1 Les hypothèses simplificatrices

Pour arriver à simplifier les équations qui régissent la propagation d'un feu de surface, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été faites et ensuite complexifiées lorsque les résultats obtenus n'étaient pas conformes à ceux attendus. Afin de comprendre la démarche adoptée, la liste ci-dessous donne les hypothèses formulées lors de la première version du modèle publiée en 2007 [131] et une importante amélioration apportée dans la version suivante [188] :

H1. Le flux d'air est considéré nul au-dessous de la flamme. C'est-à-dire que cela revient à considérer que la propagation des feux est due principalement au transfert par rayonnement.

H2. Le rayonnement de la base de la flamme agit sur le volume de la végétation à courte distance.

H3. Le rayonnement du corps de la flamme agit uniquement sur le volume du combustible qui correspond à la projection de la flamme sur le sol.

H4. Le front de flammes est considéré comme un panneau radiant gris (émissivité proche de 1).

H5. La fraction d'énergie rayonnée est donnée par la relation :

$$\chi = 0{,}3\left(\frac{ROS}{ROS_0}\right)^{-1/q} \tag{2.9}$$

avec *ROS* la vitesse de propagation du feu, ROS_0 la vitesse de propagation du feu à plat sans vent, et q une constante.

H6. L'angle d'inclinaison de la flamme est donné par la relation suivante (Figure 2.1) :

$$tan\,\gamma_c = \frac{U_n}{u_{1/2}} \tag{2.10}$$

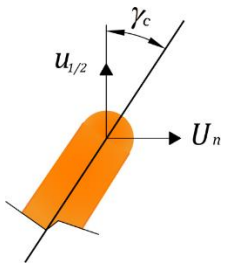


Figure 2.1 *Inclinaison de la flamme.*

où U_n est la vitesse du vent au niveau de la végétation et $u_{1/2}$ est la vitesse ascendante des gaz générés par la combustion et à mi-hauteur de la flamme.

H7. Dans le cas d'une propagation à vent nul, la vitesse de vent U_n est considéré égale au vent induit par le feu U_i., alors :

$$\tan\gamma_c = \frac{U_i}{u_{1/2}} \tag{2.10'}$$

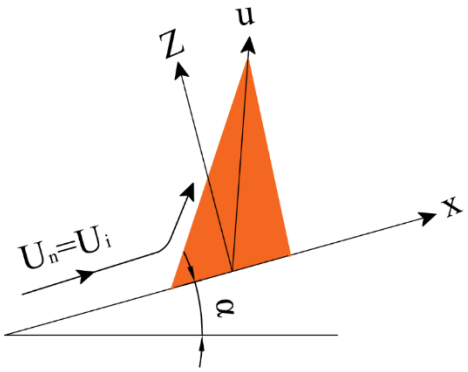


Figure 2.2 *Inclinaison de la flamme pour une propagation sous condition de vent nul.*

H8. Dans la première version du modèle, la forme imposée de la flamme était différente : base et corps rectangulaires (Figure 2.3).

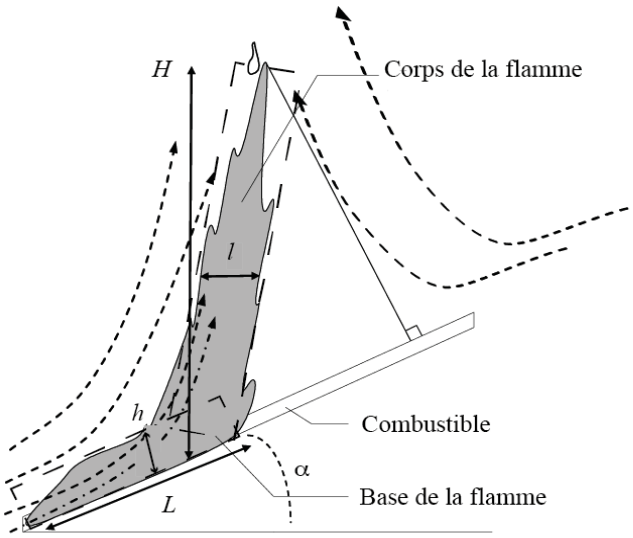


Figure 2.3 *Géométrie supposée rectangulaire de la flamme.*

Dans la seconde version, la flamme est considérée triangulaire (figure 2.4). Cette hypothèse de la flamme triangulaire a été adoptée car elle avait comme principal avantage d'écarter l'utilisation d'une loi empirique pour déterminer la hauteur de la flamme (H10).

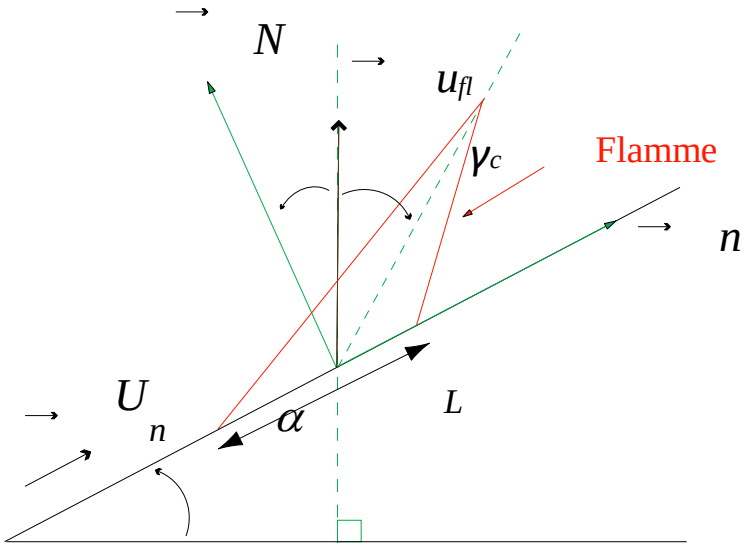


Figure 2.4 *Géométrie triangulaire de la flamme.*

H9. La masse volumique des gaz composant le corps de la flamme et la masse volumique des gaz composant la base de la flamme sont supposées égales.

H10. La hauteur de la flamme est calculée en utilisant une relation empirique établie pour des feux statiques [191].

$$H_{fl} = 0{,}08\, Q^{2/5} \tag{2.11}$$

où Q représente la quantité d'énergie dégagée par unité de longueur du front de flammes et exprimé en kW.m^{-1}.

Dans la seconde version du modèle, cette hypothèse est remplacée par une hypothèse H10' :

H10'. La condition d'ignition en un point est donnée par la relation :

$$\rho_a = s_t \rho_g \tag{2.12}$$

Avec ρ_a et ρ_g les masses volumiques de l'air et des gaz de combustion respectivement, et s_t le coefficient stœchiométrique.

H11. Les gaz sont considérés comme des gaz parfaits, les transformations s'effectuant à pressions constantes.

H12. L'entrée de l'air est considérée stœchiométrique.

H13. La dégradation de la masse suit une loi linéaire. Ainsi, la perte de masse ($\dot{\sigma}$) peut s'écrire comme ci-dessous :

$$\dot{\sigma} = \frac{\sigma}{\tau} \tag{2.13}$$

où σ représente la charge du végétal et τ le temps de résidence de la flamme.

II.3.2 Équations de base du modèle

En considérant une flamme homogène équivalente définie par des caractéristiques constantes, en utilisant les différentes hypothèses simplificatrices données précédemment et en utilisant les équations classiques de la mécanique que sont l'équation d'état, l'équation de quantité de mouvement verticale, l'équation de conservation de la masse, l'équation de conservation d'énergie et l'équation d'entrée d'air stœchiométrique, il est alors possible d'obtenir des relations plus simples à manipuler. Pour la première version du modèle [192], ces équations de base du modèle étaient :

- Équation d'état des gaz parfait : $\rho_g T_g = \rho_a T_a$ (2.14)
- Équation de quantité de mouvement verticale : $\rho_g \frac{\mathrm{d}u_{fl}}{\mathrm{d}t} = (\rho_a - \rho_g)g$ (2.15)
- Équation de conservation de la masse : $\rho_g u_{fl}\, l = (s_t - 1)L\dot{\sigma}_{fl}$ (2.16)
- Équation de conservation de l'énergie :

$$\rho_g C_{pg} u_{fl} l T_{fl} - \left(\rho_a C_{pa} h v_u T_a + L\dot{\sigma}_v C_{pv} T_v\right) = (1 - \chi)Q \tag{2.17}$$

ρ_g et ρ_a représentent respectivement la masse volumique (kg m^{-3}) des gaz de combustion et de l'air ambiant. T_g et T_a (K) représentent la température des gaz de combustion et la température de l'air ambiant, u_{fl} est la vitesse ascendante des gaz de combustion (m s^{-1}), g est

l'accélération gravitationnelle (m s^{-2}), s_t le coefficient stœchiométrique, l l'épaisseur du corps de la flamme (m) et L la profondeur du front de flamme (m). $\dot{\sigma}_{fl}$ représente la perte de la masse, C_{pa}, C_{pg}, C_{pv} représentent respectivement les capacités calorifiques de l'air ambiant, de la flamme, et du végétal et finalement χ est la fraction d'énergie rayonnée libérée par unité de temps par la réaction de combustion du végétale [193].

II.3.2.1 Caractéristiques de la flamme

En combinant les équations de base du modèle et après quelques calculs, il est possible d'obtenir des relations analytiques pour des grandeurs caractéristiques des flammes. Ces grandeurs sont : la vitesse ascensionnelle des gaz dans la flamme, la température et l'angle d'inclinaison de cette dernière.

- ***Vitesse ascensionnelle des gaz dans la flamme***

L'expression de la vitesse ascensionnelle des gaz est déterminée à partir de l'équation d'état et de la quantité de mouvement verticale en écoulement stationnaire écrite dans un référentiel lié au front en prenant pour hypothèse une répartition hydrostatique du champ de pression.

La vitesse des gaz à mi-hauteur de flamme est donnée par la relation :

$$u_{1/2} = Q^{1/5}\sqrt{\left(\frac{T_{fl}}{T_a} - 1\right) g H_{fl}} \qquad (2.18)$$

où Q représente la quantité d'énergie dégagée par unité de longueur du front de flammes, T_{fl} représente la température de la flamme, $u_{1/2}$ est la vitesse ascensionnelle des gaz de combustion à mi-hauteur de la flamme (m s^{-1}), et g est l'accélération gravitationnelle (m s^{-2}).

- ***Température de la flamme***

En utilisant la relation (2.17) et en considérant que la température des gaz émis par le combustible est très proche de la température ambiante ($T_v = T_a$), on obtient la relation suivante :

$$T_{fl} = T_a + \frac{(1-\chi)Q}{(s_t+1)L\sigma_{fu}C_{pg}} \quad (2.19)$$

En remplaçant Q par sa valeur [177] :

$$Q = \Delta h_v \sigma R OS \quad (2.20)$$

On peut obtenir la température moyenne de la flamme par l'expression suivante :

$$T_{fl} = T_a + \frac{(1-\chi)\Delta h_v}{(s_t+1)C_{pg}} \quad (2.19')$$

avec Δh_v l'enthalpie de combustion du végétal, σ la charge massique du combustible, et ROS la vitesse de propagation du feu.

II.3.2.2 Le sous modèle de rayonnement

Lors d'une propagation d'un front de flammes, le rayonnement impactant le combustible non brulé devant le feu est considéré comme étant la somme de deux contributions. La première (Φ_b) est due au rayonnement de la base de la flamme et des braises tandis que la seconde (Φ_{fl}) provient du corps de la flamme (Figure 2.5). La flamme est modélisée en utilisant l'hypothèse de la flamme solide [194].

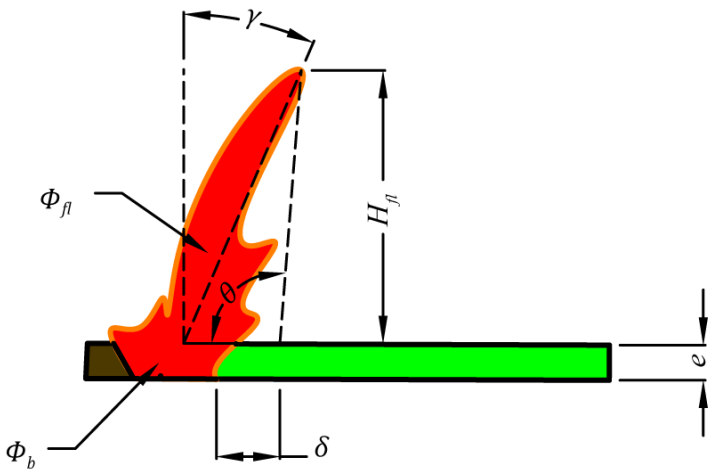


Figure 2.5 *Rayonnement de la flamme.*

II.3.2.3 Sous-modèle de rayonnement de la base de la flamme

L'expression permettant de calculer la quantité d'énergie rayonnée par la base est obtenue en considérant l'émissivité de la base égale à 1 [195]. Cette approximation s'appuie sur la présence de braises à ce niveau de la flamme [195]. Ainsi, la quantité d'énergie rayonnée par la base est donnée par la relation ci-dessous :

$$\Phi_b = \begin{cases} BT_{fl}^4 \frac{e}{\delta^2}(\delta - x), & x \leq \delta \\ 0, & x > \delta \end{cases} \quad (2.21)$$

Avec, $$\delta = \frac{n}{s\beta} \quad (2.22)$$

où x représente la coordonnée spatiale suivant l'axe normal au front de flammes, B la constante de Stephan-Boltzmann, e l'épaisseur de la végétation et δ est l'épaisseur optique moyenne dans la couche de végétation [196], s est le rapport surface-volume et β la fraction volumique du combustible.

II.3.2.4 Sous-modèle de rayonnement du corps de la flamme

En utilisant l'hypothèse du panneau rayonnant tangent de largeur infinie, à une température T_{fl} constante et d'émissivité ε_{fl}, il est possible d'obtenir une relation analytique pour

quantifier l'énergie rayonnée par ce front de la flamme et qui est reçue par le combustible devant lui :

$$\Phi_{fl} = \varepsilon_{fl} B \frac{T_{fl}^4}{2} (1 - \cos\theta) \qquad (2.23)$$

avec θ l'angle entre la normale à la base du front de feu et le segment de droite délimité par l'extrémité de la flamme et l'élément de végétation où la quantité Φ_{fl} doit être calculée (Figure 2.5).

II.3.2.5 Sous-modèle de préchauffage

En tenant compte de l'hypothèse que l'énergie impactant le combustible se situant devant le feu est due essentiellement à la composante rayonnée par les flammes, l'équation de conservation d'énergie pour le végétal devant le front de feu est donnée par la relation (2.24) :

$$\sigma C_{pv} \frac{dT_v}{dt} = \Phi_b + \Phi_{fl} - \Delta h_{\mathrm{H_2O}} \frac{d\sigma_{\mathrm{H_2O}}}{dt} \qquad (2.24)$$

avec Δh_{H2O} l'enthalpie d'évaporation et σ_{H2O} la quantité d'eau par unité de surface du végétal.

Le modèle physique simplifié distingue deux régimes pour un feu de surface :

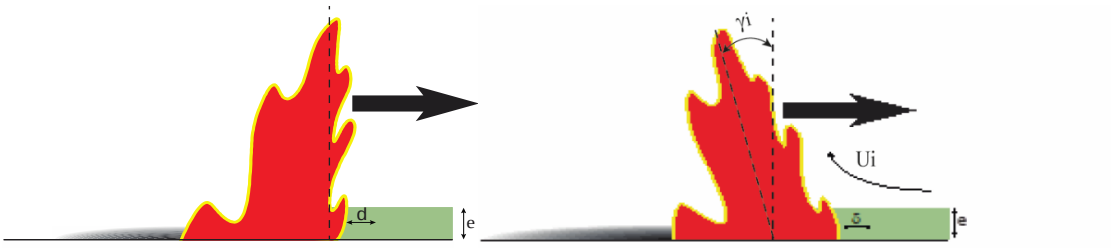
(i) Le premier correspond à un feu se propageant à plat (pente nulle) sans vent (vent nul),

(ii) Le second correspond à une propagation avec pente et/ou vent.

Dans le premier cas de figure, la vitesse du front de flammes est quasiment constante pour un combustible donné tandis que pour le second cas la vitesse est sujette à de fortes variations en fonction de la topographie et des conditions météorologiques [158,197]. Nous ne développerons ici que le premier régime car notre étude porte sur l'étude des feux marginaux mais des détails sur le second régime peuvent être trouvés dans plusieurs travaux, par exemple dans [192].

II.3.2.6 Expression de la vitesse de propagation à plat et sans vent

L'expression de la vitesse à plat sans vent de la première version du modèle physique simplifié était obtenue en considérant que lors d'une telle propagation l'angle d'inclinaison de la flamme était nul. Néanmoins, plusieurs études [155,158,197] montrent qu'à partir d'un certain seuil de la valeur du vent, le régime de propagation du feu bascule d'un régime piloté par le vent à un régime piloté par le panache thermo convectif. Une explication avancée pour expliquer ce phénomène est la suivante : tant que l'angle d'inclinaison de la flamme est supérieur à zéro (γ_c>0), la flamme est inclinée en direction du combustible imbrulé. En aval, un vent induit par le front existe (U_i) mais l'effet de ce flux d'air moins chaud provenant de la partie imbrulée est négligeable car il est supposé ne pas atteindre les braises ainsi que la partie basse des flammes. Dans ces conditions, le vent induit n'a donc qu'une d'influence minime sur la vitesse de propagation du feu. Par contre, lorsque le vent est nul, l'air chaud va s'élever dans la direction verticale sous l'effet de la poussée d'Archimède et dans la direction horizontale sous l'effet de la propagation du front. La flamme penche ainsi en sens inverse de la propagation du feu (figure 2.6). Dans ces conditions de propagation, la convection ne peut plus être négligée. Il est donc nécessaire d'intégrer l'effet du vent induit dans l'expression de la vitesse du feu à plat sans vent.



(a) ***(b)***

Figure 2.6 ***(a)*** *Vue schématique de la flamme pendant une propagation de feu de surface, en négligeant l'effet de refroidissement par l'air ;* ***(b)*** *Vue schématique de la flamme pour une propagation sans vent en tenant compte de refroidissement d'air*

II.3.2.6.1 Cas 1 – en négligeant l'effet de la convection

Supposons que le feu de surface se propage à plat (α = 0) et sous conditions de vent faible. Par conséquent, l'expression de la vitesse de propagation des feux se réduit au terme correspondant au flux radiatif dégagé par la base de la flamme et les suies, ϕ_b.

La relation (2.24) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\sigma C_{pv} \frac{\mathrm{d}T_v}{\mathrm{d}t} = \Phi_b - \Delta h_{\mathrm{H_2O}} \frac{\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{H_2O}}}{\mathrm{d}t} \qquad (2.24')$$

En posant $x' = x - ROS_0 t$ l'expression (2.22') devient alors :

$$ROS_0 \sigma C_{pv} \frac{dT_v}{dx'} = \frac{BT_{fl}^4 h}{2} - \Delta h_{\mathrm{H_2O}} \frac{ROS_0 d\sigma_{\mathrm{H_2O}}}{dx'} \qquad (2.25a)$$

En intégrant cette équation entre $x' = 0$ ($T_v = T_{ig}$ et $\sigma_{\mathrm{H_2O}} = 0$) et $x' = \delta$ ($T_v = T_{ig}$ et $\sigma_{\mathrm{H_2O}} = \sigma_{\mathrm{H_2O^0}}$), avec $\sigma_{\mathrm{H_2O^0}}$ la charge surfacique initiale en eau du combustible on obtient :

$$R0S_0 = \frac{BT_{fl}^4}{2\,\sigma\left[C_{pv}(T_{ig} - T_a) + \Delta h_{\mathrm{H_2O}} m\right]} \qquad (2.25b)$$

avec T_{ig} la température d'ignition de la végétation et $m = {\sigma_{\mathrm{H_2O}}}/{\sigma}$.

II.3.2.6.2 Cas 2 – en tenant en compte de l'effet de refroidissement de l'air

Dans ce cas l'effet du vent induit est introduit dans l'expression (2.24') qui est décrite dans ce cas de la manière suivante :

$$\sigma C_{pv} \frac{dT_v}{dt} = \Phi_b - \phi_{conv} - \Delta h_{\mathrm{H_2O}} \frac{d\sigma_{\mathrm{H_2O}}}{dt} \qquad (2.24'')$$

Rayonnement provenant de la base des flammes :

$$\Phi_b = \begin{cases} BT_{fl}^4 h \left(1 - \frac{x}{\delta}\right) \mu, & x \le \delta \\ 0, & x > \delta \end{cases} \qquad (2.26)$$

Le paramètre μ peut être calculé en considérant que la totalité de l'énergie rayonnée par la base de la flamme est absorbée par la végétation. Ainsi, il est possible d'écrire que

$$\int_0^{\delta} \Phi_b(x) dx = BT_{fl}^4 h \qquad (2.27)$$

et d'obtenir la relation suivante :

$$\mu = \frac{2}{\delta} = \frac{1}{2} s\, \beta \tag{2.28}$$

Effet dû à la convection :

On utilisait jusqu'à présent la relation suivante :

$$\Phi_{conv} = d^*\left(T_{ig} - T_a\right)\frac{x}{\delta}\left(U_n + U_i\right)^{1/2} \tag{2.29}$$

On pose maintenant

$$\Phi_{conv} = c^* U_i^{1/2}\left(T(x) - T_a\right) \tag{2.30}$$

avec

$$T(x) = \begin{cases} T_{ig} - \left(T_{ig} - T_a\right)\frac{x}{\delta}, & x \le \delta \\ T_a, & x > \delta \end{cases} \tag{2.31}$$

Considérant que dx=R_0 dt et ensuite en intégrant l'équation (2.24'') entre 0 et δ, il est possible d'obtenir une nouvelle relation analytique pour la vitesse à plat sans vent :

$$ROS_0 = \frac{h}{\sigma\left(C_{pv}\left(T_{ig} - T_a\right) + \Delta h_{\mathrm{H_2O}} m\right)}\left(B T_{fl}^4 - c^* U_i^{\frac{1}{2}}\left(T_{ig} - T_a\right)\frac{2}{S}\right) \tag{2.32}$$

Avec:

$$S = s\beta h \tag{2.33}$$

Soit la relation suivante :

$$\tan\gamma_i = \frac{4U_i}{s u_{oo}} \tag{2.34a}$$

où u_{oo} représente le coefficient de la vitesse verticale due à la combustion et est donné par l'expression ci-dessous :

$$u_{oo} = u_0 \frac{4}{\beta} \tag{2.34b}$$

L'angle d'inclinaison de la flamme est supposé constant, sachant qu'il est faible et non nul sa valeur a été fixée arbitrairement comme égale à 15° ($\gamma_i \approx 15°$). Cette valeur semble tout à fait réaliste et proche de la réalité au regard de la littérature. Ainsi, le vent induit U_i est proportionnel à S. Finalement, la vitesse du front de flammes peut être mise sous la forme :

$$ROS_0 = c_b \left(1 - \left(\frac{S_e}{S}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \tag{2.35}$$

avec

$$S_e = \left(\frac{c}{BT_{fl}^4}\right)^2 \tag{2.36}$$

et *c* une constante.

Ainsi, la vitesse de propagation d'un feu de surface à plat sans vent ROS_0 peut être évaluée par les relations (2.35a) et (2.35b) dans le cas particulier à plat et sans vent :

$$ROS_0 = \frac{1}{\beta \rho_v} \frac{\varepsilon_b B T^4}{C_{pv}(T_{ig} - T_a) + m\Delta h_{H_2O}} a_b \tag{2.37a}$$

$$a_b = \begin{cases} 1, \text{ en négligeant l'effet de refroidissement du vent induit} \\ 1 - \frac{S_e}{S}, \text{ en tenant compte de l'effet de refroidissement du vent induit} \end{cases} \tag{2.37b}$$

où S_e est une constante déterminée pour chaque famille de combustible, elle est considéré égale à 0,47 [141].

II.4 Seuil d'extinction lié à la teneur en eau du combustible

Plusieurs études ont montré l'existence d'une valeur limite de la teneur en eau du combustible (m_x) [19,119,181] au-dessus de laquelle un feu de surface est incapable de se propager. L'approche physique simplifiée propose une expression analytique pour ce seuil dans le cas d'une propagation à plat [141]. Cette section va donner les principales étapes qui ont permis de trouver cette expression.

L'expression (2.37a) ne traduit pas le fait qu'il existe une valeur critique de la teneur en eau du combustible. Si la teneur en eau de la végétation est supérieure à cette valeur critique alors le feu ne peut se propager. Afin de prendre en compte ce qui vient d'être dit, la relation (2.37a) doit être modifiée. Dans un premier temps, l'émissivité de la base de la flamme a été considérée comme égale à 1. Néanmoins, il est évident que cette hypothèse n'est pas toujours valable. En effet, si la profondeur du front de flammes *L* est plus grande que la profondeur

optique δ alors l'hypothèse est correcte. Mais, si ce n'est pas le cas ($L < \delta$) alors l'émissivité est forcément inférieure à 1. Une hypothèse a donc été avancée qui consiste à prendre une émissivité proportionnelle à la profondeur du front de flamme *L* et inversement proportionnelle à la profondeur optique δ.

L'expression de ε_b est alors définie par le système suivant :

$$\varepsilon_b = \begin{cases} 1 \text{ si } L > \delta \\ \frac{L}{\delta} si\ L < \delta \end{cases} \tag{2.38}$$

en supposant également que la largeur de la flamme est évaluée par $L = R_0\tau$, avec τ le temps de résidence de la flamme calculé par :

$$\tau = \frac{\tau_0}{s} \tag{2.39}$$

où τ_0 est le paramètre du temps de résidence de la flamme (considéré égal à 75591 s.m^{-1} [198]).

Ainsi, lorsque la teneur en eau augmente, $R0S_0$ diminue, ainsi que la largeur de la flamme. Par conséquent, l'émissivité diminue, l'énergie rayonnante diminue et $R0S_0$ tend vers zéro. Alors, lorsque la largeur de la flamme est inférieure à l'épaisseur optique, le feu perd sa capacité à se propager.

Un critère de non-propagation peut donc être tiré de cette conclusion :

$$L = ROS_0\tau < \delta \tag{2.40}$$

$$R0S_0 = \frac{\delta}{\tau} \tag{2.41}$$

En remplaçant chaque terme par sa valeur :

$$C_{pv}\left(T_{ig} - T_a\right) + m\,\Delta h_{\mathrm{H_2O}} + \frac{\tau_0 B T_{fl}^4}{n\rho_v}\left(\frac{S_e}{S}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\tau_0 B T_{fl}^4}{n\rho_v} \tag{2.42}$$

on obtient l'expression du seuil d'extinction de la teneur en eau du combustible défini par :

$$m_x = \frac{\tau_0 B T_{fl}^4}{n\rho_v}\left(1 - \frac{S_e}{S}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{C_{pv}(T_{ig} - T_a)}{\Delta h_{\mathrm{H_2O}}} \tag{2.43}$$

Au-delà de cette limite m_x, le feu ne se propage plus.

Finalement l'expression de la vitesse de propagation du feu à plat sans vent peut être reformuler de la façon suivante :

$$R0S_0 = \frac{1}{\beta \rho_v} \frac{\varepsilon_b B T^4}{C_{pv}(T_{ig} - T_a) + m\Delta h_{H_2O}} \; a_b \; \Gamma(m - m_x) \tag{2.44}$$

$$a_b = \begin{cases} 1, \text{ en négligeant l'effet de refroidissement du vent induit} \\ 1 - \frac{S_e}{S}, \text{ en tenant compte de l'effet de refroidissement du vent induit} \end{cases} \tag{2.44b}$$

$$\Gamma(m - m_x) = \begin{cases} 1, & m < m_x \\ 0, & m \geq m_x \end{cases} \tag{2.44c}$$

Étude de sensibilité du modèle de seuil d'extinction

La sensibilité du modèle semi-physique de seuil d'extinction est étudié pour des données d'un combustible herbacé, homogène et vivant. Le tableau *2.1* résume les paramètres utilisés dans le cas de l'herbe.

Tableau 2.1 *Données utilisées dans le cas de l'herbe* [18].

Paramètre	**Valeur**
Épaisseur	70 cm
Masse volumique	500 kg m^{-3}
Rapport surface volume	4000 m^{-1}
Fraction volumique	0,002
Charge surfacique	0,7 kg m^{-2}
Capacité calorifique	1810 kJ kg^{-1} °C^{-1}
Température ambiante	25 °C
Enthalpie de combustion	$17{,}3 \times 10^6$

La valeur du seuil d'extinction calculé pour ce scénario est 24 %. Le tableau 2.2 donne les résultats obtenus pour ce seuil d'extinction mais avec une variation de $\pm$ 10 % de chaque paramètre.

Tableau 2.2 *Étude de sensibilité appliquée au modèle semi-physique du seuil d'extinction de la teneur en eau pour le combustible herbacé.*

	Erreur commise avec minoration de la valeur du paramètre de 10 % (%)	**Erreur commise avec majoration de la valeur du paramètre de 10 % (%)**
Épaisseur	2,8	2,4
Rapport surface volume	2,8	2,4
Fraction volumique	2,8	2,4
Masse volumique	23,7	19,4
Capacité calorifique	11,3	11,3
Température ambiante	11,3	11,3
Enthalpie de combustion	59,16	74,7

Ces résultats permettent de voir que ce modèle est très sensible à la variation de l'enthalpie de combustion de la végétation et de sa masse volumique. En effet, une simple variation de $\pm$ 10 % entraîne une erreur de 59 à 74 % sur l'évaluation du seuil d'extinction. En outre, une variation de $\pm$ 10 % de la masse volumique entraîne une erreur de 19 à 23 %. Par contre, la même variation effectuée sur les autres paramètres de ce modèle n'entraîne qu'une erreur maximale de 11,3 %. Cela met en évidence le fait que les modèles de végétations à utiliser doivent avoir comme premier critère : fournir dans un premier temps des enthalpies de combustion les plus réalistes possibles et dans un deuxième temps une mesure bien précise de la masse volumique du combustible.

II.5 Modélisation empirique : formule de Wilson

Wilson [19] a développé un indice d'extinction afin de décrire le comportement d'un feu de surface dans les conditions marginales. Cet indice relie le seuil d'extinction à la teneur en eau et au Leaf Area Index (LAI) de la végétation.

II.5.1 LAI : définition et importance

L'indice de surface foliaire (LAI) est une grandeur adimensionnelle qui exprime la surface foliaire d'un arbre, d'un peuplement, d'un écosystème ou d'un biome par unité de surface de sol. Cet indice est souvent utilisé comme indicateur de la croissance et de la biomasse végétale [199]. En effet, il est considéré comme un paramètre essentiel en écologie végétale vu son influence sur la transpiration des arbres, l'évaporation du sol, la transpiration de la strate herbacée, et l'interception des précipitations [200]. Il est possible de le calculer en utilisant l'expression suivante $LAI = \frac{S}{2} = \frac{\beta s}{2} \times e$ [201].

Cet indice joue un rôle important dans le comportement du feu. En effet, les transferts thermiques dépendent directement de la structure de la végétation. Par exemple, le modèle semi-physique de comportement des feux de surface proposé par l'université de Corse [131,188,202] considère le LAI comme un paramètre important dans l'évaluation de la vitesse de propagation du feu à plat sans vent et également dans celui de la détermination du seuil en teneur en eau d'extinction du végétal au-dessus de laquelle le feu ne peut pas se propager [141]. De plus, ce modèle propose même un critère d'extinction du feu qui permet de calculer une valeur seuil du LAI au-dessous de laquelle le feu s'éteint [141]. Wilson en 1985 avait déjà proposé une formule empirique dépendant du LAI et prédisant la teneur en eau limite du combustible au-dessus de laquelle le feu devait s'éteindre [19].

Il est possible de déterminer le LAI à l'aide de plusieurs méthodes [200,201]. Ces méthodes sont classées en méthodes directes, semi-directes et indirectes.

Méthodes directes

Les méthodes directes consistent à réaliser des mesures dans la végétation ou à prélever l'ensemble des feuilles appartenant à cette végétation, à partir d'une collecte sur pieds ou au sol. Dans le cas où les feuilles sont prélevées dans l'arbre, la couronne est étagée en plusieurs couches. Le calcul de la surface foliaire de chaque couche est donné par une formule qui fait appel au poids total des feuilles sèches d'une couche, au poids précis de quelques feuilles aléatoirement sélectionnées dans cette couche et à la surface de ces quelques feuilles sectionnées. Ces méthodes directes demandent donc un travail lourd et beaucoup de temps de traitement. De plus, ces mesures sont destructives et inexactes en raison du dessèchement des feuilles et de la diminution de leur poids une fois récoltées.

Méthodes semi-directes

Ces méthodes permettent de déterminer le LAI par opération directe sur la végétation et sans avoir besoin de récolter le feuillage. Un exemple de ces méthodes est la technique des « points-contacts » utilisés par Jonckheere et al., 2004 [201]. Elle consiste à compter le nombre de points de contact du feuillage sur une sonde qui est érigée à travers la couronne. Ces méthodes ne sont donc pas destructives. Cependant, elles dépendent fortement des erreurs de mesure et de la formule mathématique employée.

Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes sont réalisées à l'aide des techniques de télédétection en mesurant la lumière transmise à travers la canopée. Deux catégories de mesure sont employées selon la source de rayonnement : la méthode est dite passive si cette source est le soleil, et active si la lumière est générée spécialement pour la mesure, comme du lidar.

II.5.2 Tests expérimentaux

471 tests expérimentaux sont menés dans les conditions marginales avec des bâtons forestiers et de la frisure de bois. Le conditionnement du combustible est réalisé par la méthode d'immersion, qui facilite l'ajout d'une quantité d'eau en excès pour que la teneur en eau dépasse le point de saturation des fibres de la végétation. La frisure de bois est distribuée d'une manière homogène en gardant constante l'épaisseur du lit du combustible. Or, dans le cas des frisures de bois et de lits plus épais, le combustible est étalé, couche par couche, afin de garder l'homogénéité du lit et obtenir une épaisseur constante tout au long de la table du travail.

L'ignition est déclenchée en ajoutant 10 à 15 ml de méthanol aux premiers 20 cm du lit de combustible, rempli de la frisure de bois sèche, en gardant la même épaisseur du lit de la végétation.

Le tableau 2.3 résume des différentes propriétés physico-chimiques des combustibles utilisés. Il permet de préciser les configurations d'application du modèle empirique de Wilson.

Tableau 2.3 *Les propriétés physico-chimiques des différentes espèces des combustibles utilisés pour réaliser les tests.*

Propriétés		Espèce de la végétation					
		Frisure de bois	**Aiguilles de pins**	**Douglas-Fir**	**Pin de Ponderosa**	**Pin de Ponderosa**	**Mélange de conifères**
Épaisseur des particules (cm)		0,049	0,159	0,317	0,635	1,27	3,81
Rapport surface volume (cm^{-1})		81,3	25,2	12,6	6,3	3,15	1,05
Fraction volumique	**min**	0,00063	0,0025	0,005	0,01	0,01	0,1
	max	0,08	0,08	0,16	0,16	0,32	0,4
Charge surfacique (kg m^{-2})	**min**	0,03	0,27	0,115	0,224	0,448	17,74
	max	1,77	0,85	3,58	3,58	14,32	17,74
Masse volumique (kg m^{-3})		398	352	450	442	444	388
Enthalpie de combustion (kJ kg^{-1})		18274	19652	18703	19660	19163	18907

II.5.3 Résultats et discussions

Wilson a trouvé que la vitesse de propagation des feux est inversement proportionnelle à l'épaisseur des particules et à la teneur en eau de la végétation. Cette tendance est observée régulièrement jusqu'à ce que la teneur en eau de la végétation atteigne une valeur critique où le feu devient marginal ou s'éteint. En outre, Wilson a remarqué que le ROS et l'intensité des feux oscillent entre une crête maximale et une crête minimale lorsque la teneur en eau de la végétation s'approche du seuil critique d'extinction. Il a, également, observé que lorsque le LAI de la végétation augmente, le feu a tendance à se propager pour des teneurs en eau plus élevées. Alors, une loi d'extinction est tirée des différents tests de brûlage effectués qui relie le seuil d'extinction au LAI :

$$m_x = 0{,}25 \times \ln(4 \times LAI) \qquad (2.45)$$

Wilson [146] a introduit un indice d'extinction n_x qui représente le rapport entre l'énergie dégagée de la zone enflammée et absorbée par la surface foliaire S du combustible, et l'énergie nécessaire pour la propagation du feu.

$$n_x = \frac{\ln(s\beta e\Delta H/\Delta h_{H_2O})}{0{,}01m+Q_{pyr}/\Delta h_{H_2O}} \quad (2.46)$$

où m est la teneur en eau de la végétation, ΔH est l'enthalpie de combustion des gaz de pyrolyse (kJ kg^{-1}), Δh_{H_2O} l'enthalpie d'évaporation de l'eau (considérée égale à 2550 kJ kg^{-1}), et Q_{pyr} l'enthalpie de pyrolyse.

Chapitre III. Tests expérimentaux à l'échelle du laboratoire

Une campagne d'expériences a été menée au sein du laboratoire « UMR CNRS 6134 SPE » de l'Université de Corse avec l'aide du Dr Frédéric Morandini, ingénieur de recherche en instrumentation et expérimentation au sein du projet Feux de l'Université de Corse. Les différents tests ont été réalisés avec de la frisure de bois, à l'échelle de laboratoire, à plat et sans vent.

Trois séries de 48 tests furent effectuées avec des charges surfaciques différentes : 8 tests avec une charge de 0,15 kg m^{-2}, 27 avec une charge de 0,2 kg m^{-2} et 27 avec une charge de 0,4 kg m^{-2}. Cette partie expérimentale avait plusieurs objectifs. Les 27 tests réalisés avec une charge surfacique de 0,2 kg m^{-2} ont permis de vérifier l'influence de la teneur en eau sur la vitesse de propagation des feux. De plus, pour chaque série de tests, la valeur de la teneur eau du combustible au-delà de laquelle le feu ne se propage plus et appelée seuil d'extinction a été déterminée. Les résultats obtenus ont été confrontés au modèle physique simplifié d'extinction [141] proposé par Balbi *et al*. en 2014 et à ceux obtenus avec FireStar2D. Ces tests ont également permis d'évaluer la variation du seuil d'extinction en fonction de la charge

surfacique. Dans ce chapitre, les différents procédés expérimentaux ainsi que les résultats obtenus sont détaillés.

III.1 Choix et conditionnement du combustible

III.1.1 Choix du combustible

Dans le but d'évaluer l'influence de la teneur en eau du combustible sur la dynamique des feux et aussi de déterminer les différents seuils d'extinction pour chaque *m*, un intervalle de *m* assez étendue a été choisi. Ainsi, la teneur en eau de la végétation a été comprise entre 0 et 114 %. Cette contrainte a donc conduit à privilégier un combustible facile à conditionner. En effet, la forme et la structure de la frisure de bois rendent plus aisées les différentes manipulations qui permettent d'atteindre les valeurs de *m* souhaitées. L'autre contrainte forte portait sur l'obligation d'avoir une densité de combustible homogène sur toute la table de combustion pendant les différents tests. Pour cela, une attention particulière a été apportée afin de maintenir une épaisseur du lit de combustible constante (Figure 3.1).



Figure 3.1 *Distribution du combustible sur la table de combustion d'une manière homogène.*

Les différentes propriétés physiques du combustible sont données dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Tableau 3.1 *Propriétés physico-chimiques du lit de combustible utilisé pendant les expériences (frisure de bois)* [203,204] .

Propriétés physiques	**Valeur**
Masse volumique (kg m^{-3})	780
Capacité calorifique du combustible (kJ kg^{-1} K^{-1})	1 430
Rapport surface volume (m^{-1})	19 723
Fraction volumique	0,0032
Épaisseur du lit du combustible (m)	0,06 - 0,08 - 0,16
Teneur en eau (%)	Entre 0 et 114 %

III.1.2 Conditionnement du combustible

Pendant les différents tests de brulage, l'humidité relative et la température ambiante ont varié entre 35 et 60 % et entre15 et 23 °C respectivement. Cependant, la teneur en eau de la frisure de bois a varié entre 11 et 13,2 %. Cette teneur en eau n'étant pas assez élevée pour provoquer l'extinction d'un feu qui se propage, il a été nécessaire de le conditionner pour atteindre des valeurs plus élevées. Il est à noter que comme un des objectifs de cette étude était également de montrer l'impact de la FMC sur la dynamique du feu, le combustible a également été conditionné pour obtenir des valeurs plus faibles que 13,2 %. Ce conditionnement doit satisfaire deux exigences importantes : la première est la possibilité de contrôler la teneur en eau pendant l'opération et la seconde est l'obtention d'un combustible ayant des propriétés homogènes sur toute la surface de brûlage. Pour obtenir une teneur en eau nulle, le combustible

est mis dans une étuve à 60 °C pendant 48 heures. Pour le conditionner à une teneur en eau plus élevée que 13,2 %, une quantité d'eau doit être ajoutée au combustible.

III.1.2.1 Technique par ajout d'eau

Une première technique de conditionnement fut appliquée en ajoutant une masse d'eau bien déterminée au combustible. Cette quantité d'eau doit être proportionnelle à la FMC voulue. Ainsi, la masse d'eau à ajouter est calculée en utilisant la relation [205]:

$$\psi_{eau} = (\psi_0 * m) \quad (3.1)$$

où *m* est la teneur en eau voulue, ψ_0 est la masse sèche du combustible (masse à une *m* de 0 %).

Le combustible obtenu après l'arrosage n'était pas homogène. Et, la teneur en eau finale obtenue était loin de celle désirée. En fait, durant l'opération, une quantité de la masse d'eau ajoutée est restée collée sur les surfaces de l'arroseur à pression et du récipient. Ainsi, cette technique fut donc abandonnée au profit d'une méthode de conditionnement plus efficace.

III.1.2.2 Technique par immersion

Lors de son étude portant sur les feux marginaux, Wilson [19] a adopté la méthode par immersion pour conditionner des combustibles caractéristiques du couvert végétal forestier.

La méthode d'immersion consiste à immerger totalement le combustible dans l'eau pour que sa teneur en eau dépasse le point de saturation de ses fibres qui est de l'ordre de 30 %.

Cette méthode se déroule en quatre étapes successives :

1. Tout d'abord, la masse de combustible qui correspond à la charge surfacique sèche choisie est pesée, en prenant en compte la teneur en eau du combustible sous conditions de température ambiante (Figure 3.2).



Figure 3.2 *Pesage de la quantité nécessaire de la frisure de bois à 13,2 % d'humidité.*

2. Ensuite, le combustible est totalement immergé dans l'eau pour que sa teneur en eau dépasse les 200 %. (Figure 3.3)



Figure 3.3 *L'immersion totale de la frisure de bois dans l'eau*

3. Lors de la troisième étape le combustible est mis dans plusieurs bacs laissés ouverts pour que le combustible sèche à l'air libre. (Figure 3.4)



Figure 3.4 *Séchage à l'air libre de la frisure de bois.*

4. La quatrième étape consiste à mélanger régulièrement le combustible, qui sèche, afin d'obtenir un taux d'humidité homogène. Périodiquement, des pesages sont effectués afin de contrôler la teneur en eau atteinte par la formule suivante :

$$m_i = \frac{\psi_{i-}\psi_0}{\psi_0} \tag{3.2}$$

où, m_i est la teneur en eau mesurée, ψ_i est la masse instantanée mesurée du combustible et ψ_0 est la masse du combustible calculé à une teneur en eau nulle.

Malgré l'efficacité de cette méthode, le temps nécessaire pour la préparation s'avère assez long. En effet, les différentes séries d'expériences ont été effectuées pendant une période de 12 semaines, ainsi, environ 4 manipulations par semaine. De plus, comme le laboratoire de l'Université de Corse n'est pas équipé d'une chambre de conditionnement, le nombre de tests par semaine était limité et nous a donc demandé de faire des choix en ce qui concerne les cas traités.

III.2 Procédés expérimentaux

48 tests ont été réalisés en laboratoire à plat et sans vent afin d'étudier l'influence de la teneur en eau sur la vitesse de propagation des feux et surtout afin de déterminer systématiquement la valeur limite de la teneur en eau du combustible engendrant une extinction de ce dernier. Les résultats ont été comparés à ceux trouvés dans la littérature, à ceux obtenus par le modèle physique simplifié proposé par Balbi *et al.* [141] et aussi par un code complet FireStar2D [47,206,207].

III.2.1 Dispositif expérimental

Tous les tests ont été réalisés au sein de l'Université de Corse dans un laboratoire sans mouvement d'air et le combustible utilisé fut de la frisure de bois. Ce laboratoire est équipé d'un système d'extraction des fumées qui consiste en un calorimètre ayant un débit volumique de 1 m^3 s^{-1} (Figure 3.5).

La table à combustion fut placée sous ce dispositif. Deux parois verticales en *Pregyflam* ont été fixées le long de la table (Figure 3.6). Le *Pregyflam* est caractérisé par une résistance thermique élevée. Les deux parois servent à réduire la courbure du front de la flamme et à obtenir un front quasi-vertical en empêchant l'entraînement des flux d'air latéraux à l'intérieur du front du feu [208] (Figure 3.6), ceci afin de pouvoir avoir les mêmes conditions que celles des approches théoriques du modèle physique simplifié et de FireStar2D qui considèrent un feu avec un front de flamme infini (front de flamme rectiligne).

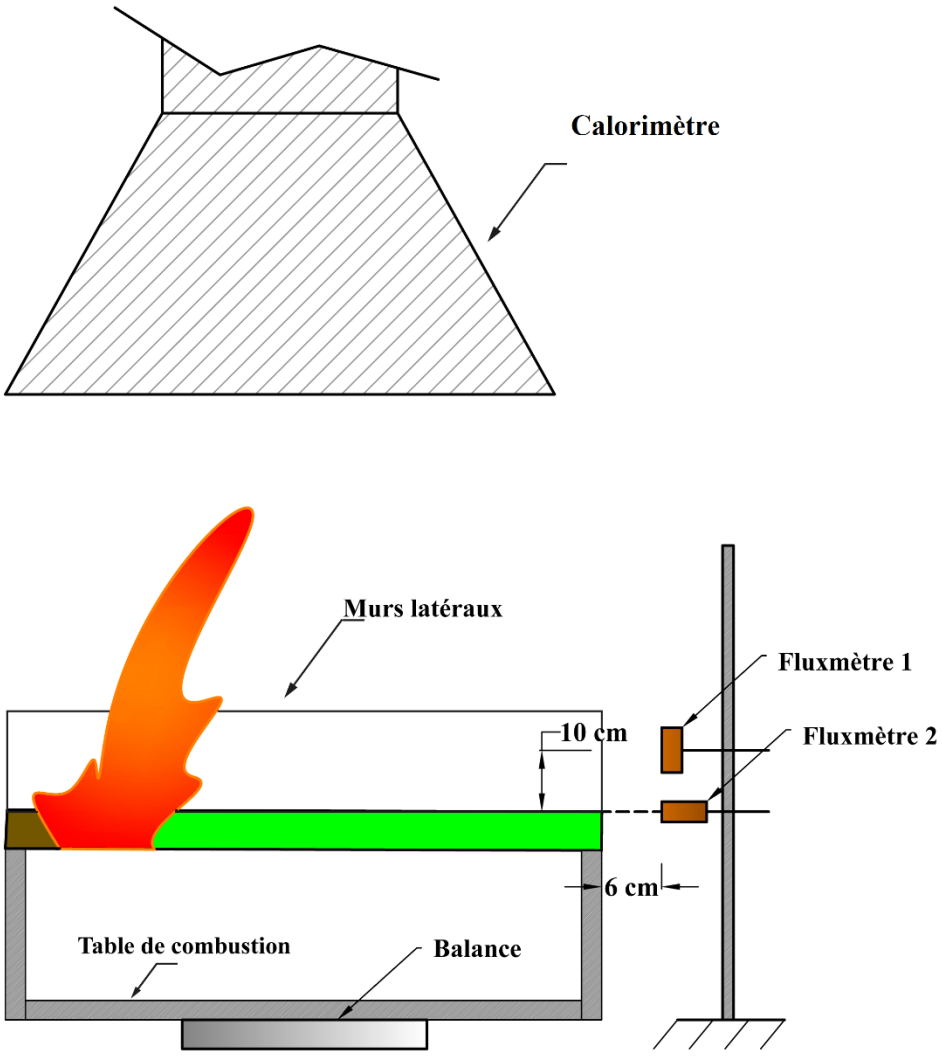


Figure 3.5 *Dispositif expérimental.*



Figure 3.6 *Front de la flamme vertical obtenu pour un test de brûlage d'un lit de frisure de bois caractérisé par une charge de 0,2 kg* m^{-2}.

La table de combustion est équipée de quatre thermocouples de type *KMTSS-IM02.5G-300*, caractérisés par une sonde de 2,5 µm de diamètre. La sonde est positionnée à 2,5 cm au-dessus de la surface de la table, afin de mesurer la variation de la température dans la base de la flamme en fonction du temps (Figure 3.7).

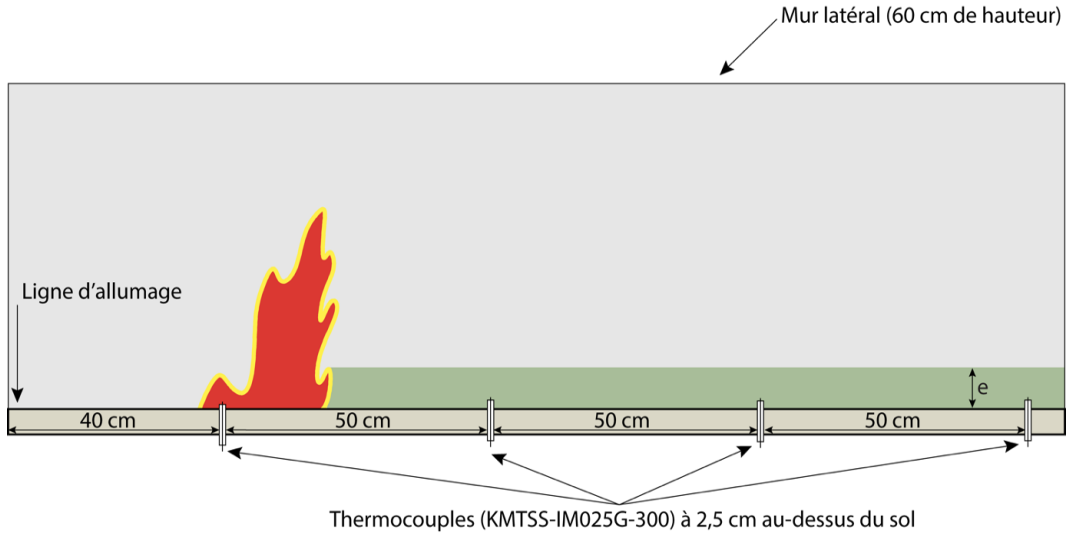


Figure 3.7 *Dispositif expérimental.*

Les flux de chaleur émis par le front de flammes lors de la propagation sont mesurés grâce à deux fluxmètres disposés verticalement et horizontalement au lit du combustible en bout de table de combustion (Figure 3.5). Les fluxmètres sont de type *Medtherm* de la série 64 équipés par un système de refroidissement par circuit d'eau et par une sortie analogique 0 - 10 mV.

Le premier, de modèle *Schmidt Boelter* étalonné dans la gamme 0-100 kW m^{-2} avec un champ de vision de 180°, est monté d'une manière parallèle au lit du combustible. Il permet de mesurer le flux total émis par le front de flammes. Le second, de modèle *Schmidt Boelter* étalonné dans la gamme 0 - 20 kW m^{-2} avec une fenêtre saphir (gamme de longueurs d'onde 0,2 – 5,5 µm), avec un champ de vision de 150°, est disposé d'une façon perpendiculaire au lit du combustible, et situé au même niveau de sa surface libre. La fenêtre de saphir empêche

l’arrivée du flux convectif émis par le front de la flamme à la sonde du fluxmètre, ce qui lui permet de mesurer uniquement le flux radiatif émis par le front.

Le banc de combustion est posé sur une balance de type Vishay Nobel modèle TAD3 avec une précision de 3 g et une limite supérieure de mesure de 300 kg, et disposant d’une sortie numérique branchée en direct sur l’ordinateur permettant d’enregistrer l’évolution de la masse du combustible restant sur la surface de propagation (Figure 3.5).

III.2.2 Tests expérimentaux

Avant chaque série de tests, un premier brûlage est systématiquement réalisé afin de chauffer la surface du banc et les parois latérales afin d’obtenir des conditions similaires pour toutes les expériences. Le combustible est réparti d'une manière homogène sur l’ensemble de la surface du banc. Avant chaque essai, 10 g du combustible sont prélevés et mis dans l'étuve à 60 °C pendant 48 heures afin de déterminer la teneur en eau du combustible. La mise à feu est réalisée à l'aide de 4 ml de méthanol versés de manière uniforme sur les premiers 5 cm de la frisure de bois à l’aide d’une pipette le long d’un côté du lit de combustible qui sera perpendiculaire aux deux parois verticales positionnées par la suite (Figure 3.8). Si le front de flammes se propage jusqu’au bout du banc alors le test est considéré comme positif. Pour les tests positifs, la vitesse de propagation du feu est évaluée en utilisant les relevés des thermocouples. Le front est considéré comme ayant atteint la position du thermocouple lorsque ce dernier relève une température de 300 °C [206].



Figure 3.8 *Conception de la ligne d'allumage à l'aide du méthanol versé sur les premiers 5 cm du combustible.*

La fraction volumique est conservée constante à 0,0032 pendant les différents tests de brulage. Le tableau 3.2 détaille les différentes données expérimentales mesurées durant les 48 tests de brulages.

Tableau 3.2 *Données expérimentales relevées pour les tests expérimentaux réalisés au sein de l'Université de Corse avec la frisure de bois.*

Test	**Épaisseur du lit (m)**	**Charge surfacique (kg m^{-2})**	**Teneur en eau du combustible (%)**	**Température ambiante (°C)**
1	0,06	0,15	35,1	23
2	0,06	0,15	71	22,6
3	0,06	0,15	58,6	22,1
4	0,06	0,15	55,1	20,5
5	0,06	0,15	41	21
6	0,06	0,15	46,6	21
7	0,06	0,15	41,2	23
8	0,06	0,15	56,3	23,1
9	0,08	0,2	0	18
10	0,08	0,2	0	17,6
11	0,08	0,2	0	18,1
12	0,08	0,2	0	18
13	0,08	0,2	13,06	18,7
14	0,08	0,2	14,1	19,1

15	0,08	0,2	12,9	19,3
16	0,08	0,2	14,6	19,7
17	0,08	0,2	12,9	18
18	0,08	0,2	13,3	18
19	0,08	0,2	12,4	18
20	0,08	0,2	65,2	18,3
21	0,08	0,2	31,5	18,2
22	0,08	0,2	32,7	18,2
23	0,08	0,2	32	18,2
24	0,08	0,2	33,8	18,7
25	0,08	0,2	50,4	18,4
26	0,08	0,2	46,4	18,1
27	0,08	0,2	23,1	21,4
28	0,08	0,2	28	21,3
29	0,08	0,2	0	22,1
30	0,08	0,2	39,6	19
31	0,08	0,2	57,8	18,1
32	0,08	0,2	0	18,2
33	0,08	0,2	0	18,1
34	0,08	0,2	34	18
35	0,08	0,2	48,1	17
36	0,16	0,4	46	17
37	0,16	0,4	114	17
38	0,16	0,4	7,6	17
39	0,16	0,4	70,7	15
40	0,16	0,4	29,7	15
41	0,16	0,4	50	16
42	0,16	0,4	61,3	17
43	0,16	0,4	55	18
44	0,16	0,4	41,2	20,7
45	0,16	0,4	56,3	21
46	0,16	0,4	65	19
47	0,16	0,4	62	21
48	0,16	0,4	71	21,0

Chapitre IV. Un outil d'expérimentation numérique : FireStar2D

IV.1 Présentation de FireStar2D

FireStar2D est un code numérique qui étudie la propagation d'une ligne de feux de forêt en se basant sur une formulation multiphasique inspirée du modèle proposé par Grishin et publié dans les années 90 [125]. Développé par le Professeur Dominique Morvan d'Aix-Marseille Université, ce code numérique permet de réaliser une description complète et détaillée des divers phénomènes physico-chimiques qui contribuent à la propagation d'un feu à travers un milieu solide poreux.

FireStar2D est basé sur une formulation physique complète à faible nombre de Mach, qui traite la problématique des feux de forêts en analysant ses divers aspects physico-chimiques. Ainsi, il aide à bien comprendre les différents aspects des phénomènes liés aux feux et il permet d'investiguer l'influence de divers paramètres reliés à la végétation, aux conditions météorologiques ou à la topographie sur le comportement des feux de forêt [207,209]. Ainsi, cette formulation est utilisée comme un outil de prévention contre les incendies en étudiant l'efficacité des techniques utilisées dans celle-ci, comme par exemple la réduction du

combustible pour empêcher la transition d'un feu de surface vers un feu de cime ou même étudier l'interaction entre deux fronts de flamme [210,211]. De plus, cette approche physique complète permet d'étudier la propagation des feux à travers un modèle de combustible homogène, comme un lit d'aiguilles de pins [212] ou de l'herbe [18,213], ou hétérogène, comme une couche arbustive avec une strate herbacée [47]. Par contre, elle nécessite des ressources et du temps de calcul plus importants que les modèles empiriques et semi-empiriques, ce qui exclut sa capacité à résoudre les problèmes en temps réel.

L'approche multiphasique représente le système couplé par la phase solide (la végétation) et la phase gazeuse (mélange d'air frais et des produits issus de la pyrolyse et de la combustion) comme un milieu poreux entouré par un mélange de gaz. Les différents éléments constituants la végétation sont représentés par des familles de particules solides (tiges, feuilles, troncs, ...) caractérisées par des propriétés influençant la dynamique des feux (forme, taille, rapport surface volume, fraction volumique, masse volumique, …). Chaque famille de la phase solide est décrite par la fraction massique de ses quatre constituants : l'eau, la matière sèche, le charbon et les cendres. L'évolution en fonction du temps de chaque constituant de la phase solide est gouvernée par un système d'équations différentielles (ODE) qui représentent la dégradation de masse d'eau, de la matière sèche, et du charbon en plus des équations d'évolution de la masse totale du solide, sa fraction volumique et sa température. La dégradation de la végétation est gouvernée par trois mécanismes principaux dépendant de la température : la déshydratation, la pyrolyse et la combustion du carbone.

L'évolution de la phase gazeuse est décrite par la résolution des équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et des espèces chimiques (O_2, N_2, CO, CO_2 et H_2O) filtrées par la moyenne de Favre [214]. Le modèle de turbulence hydrodynamique utilisé est à nombre de Reynolds élevé RNG[5] (k-ε) ce qui ajoute deux

[5] Renormalization Group

équations de transport correspondant à l'énergie cinétique k et le taux de dissipation ε caractérisant l'écoulement [215,216]. Le couplage de la température et de l'enthalpie est traité grâce aux données thermodynamiques fournies du logiciel de CHEMKIN [217], en considérant que les processus de déshydratation et de pyrolyse produisent de H_2O, CO et CO_2 dans la phase gazeuse [125]. Le modèle de combustion est basé sur le concept de diffusion turbulente (« Eddy Dissipation Concept (EDC) ») qui permet de déterminer le taux de combustion dans la phase gazeuse [218,219]. Finalement, vu l'importance du rôle joué par le flux radiatif dans la propagation du front de flammes, l'évolution des suies au sein de l'écoulement est déterminée à travers la résolution des équations de transport des fractions volumiques des particules des suies et de leur masse volumique [220].

L'interaction entre la phase solide et gazeuse est prise en compte à travers des termes d'échanges qui apparaissent dans les deux parties du modèle. Le couplage, dans les équations de conservation de la quantité de mouvement, est obtenu par l'addition d'un terme relié à la force de traînée. Les transferts de chaleur entre le solide et la phase gazeuse sont évalués à l'aide d'une corrélation empirique permettant de déterminer le coefficient de transfert convectif et de la résolution de l'équation de transfert radiatif (ETR). Le transfert de masse est pris en compte en ajoutant des termes d'entrée/sortie aux équations de conservation de masse totale correspondantes aux deux phases.

Ce chapitre permet de détailler la formulation multiphasique utilisée pour décrire la propagation d'un front de flamme et de présenter les différentes méthodes mathématiques et numériques modélisant et résolvant les problèmes physico-chimiques qui ont lieu lors de la propagation de ce front.

IV.2 Formulation multiphasique

Comme déjà mentionnée ci-dessus, la formulation utilisée dans FireStar2D est constituée par le couplage des deux phases solide et gazeuse par certains termes d'échange reliés à la masse, à la quantité de mouvement et à l'énergie. Dans ce qui suit, une première partie décrit l'évolution de la phase solide suite à son exposition aux différents flux thermiques émis par la flamme et la zone de combustion. Une deuxième partie étudie l'évolution du mélange des gaz de pyrolyse, produits par la dégradation de la phase solide, avec l'air ambiant.

IV.2.1 Modélisation de la phase solide

L'hétérogénéité de la végétation (feuilles, tiges,) est prise en compte dans cette formulation en représentant chaque élément par une famille *k* spécifiée par certaines propriétés physico-chimique [47,206]. Ainsi, chaque famille *k* représente un ensemble d'éléments caractérisés par des propriétés bien spécifiques comme la forme (cylindrique, disque, sphérique), la masse volumique ρ_v^k, le rapport surface volume s^k, la fraction volumique β^k, la teneur en eau m^k et sa composition chimique et sa température T_s^k.

Après la soumission d'un élément de la phase solide au flux émis par la flamme et par la zone de combustion, sa température augmente pour atteindre 373 K où il subit une déshydratation isotherme. À la fin de cette étape, sa température continue à augmenter jusqu'à 400 K où la pyrolyse se déclenche. Cette réaction produit un mélange de gaz volatiles et le reste de la phase solide se transforme en charbon. [47,221,222]. Pendant cette dégradation, plusieurs composants se mettent en évidence : l'eau, la matière sèche (cellulose, hémicellulose et lignine) et finalement le charbon et les cendres qui sont les composants minéraux.

L'évolution de chaque constituant pendant la dégradation est décrite par la variation de la fraction massique de l'eau $Y_{\mathrm{H_20}}$, de la matière sèche Y_s^k, du charbon Y_{Char}^k, et des minéraux en

fonction du temps et résolue d'après les lois de conservation de masse, des espèces et d'énergie évaluées pour chaque famille (k) de la phase solide [47,207,213]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\beta_S^k \rho_v^k Y_{\mathrm{H_2O}}^k\right) = -\dot{\omega}_{\mathrm{H_2O}}^k \tag{4.1}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\beta_S^k \rho_v^k Y_s^k\right) = -\dot{\omega}_{\mathrm{Pyr}}^k \tag{4.2}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\beta_S^k \rho_S^k Y_{\mathrm{Char}}^k\right) = (\nu_{\mathrm{Char}} - \nu_{\mathrm{Suies}})\ \dot{\omega}_{\mathrm{Pyr}}^k - \ \dot{\omega}_{\mathrm{Char}}^k \tag{4.3}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\beta_s^k \rho_v^m) = -\dot{\omega}_{\mathrm{Vap}}^k - (1 - \nu_{\mathrm{Char}} + \nu_{\mathrm{Suies}})\ \dot{\omega}_{\mathrm{Pyr}}^k - \left(1 - \frac{\nu_{\mathrm{cendres}}}{\nu_{\mathrm{Char}} - \nu_{\mathrm{Suies}}}\right)\ \dot{\omega}_{\mathrm{Char}}^k$$

$$= -\sum M_s \tag{4.4}$$

$$\frac{d}{dt}(\beta_s^k) = -\ \frac{1}{\rho_v^k}\dot{\omega}_{\mathrm{Char}}^k \tag{4.5}$$

$$\beta_s^k \rho_v^k C_{ps}^k \frac{\mathrm{d}T_s^k}{\mathrm{d}t} = Q_{+/-}^{(s)} - \Delta h_{\mathrm{vap}} \dot{\omega}_{\mathrm{H_2O}}^k - \Delta h_{\mathrm{pyr}} \dot{\omega}_{\mathrm{pyr}}^k - \alpha \dot{\omega}_{\mathrm{Char}}^k \Delta h_{\mathrm{Char}} \tag{4.6}$$

L'équation (4.1) représente la conservation de masse de la teneur en eau du combustible (déshydratation), l'équation (4.2) la conservation de masse de la matière sèche (pyrolyse), et l'équation (4.3) la conservation de masse du charbon (production des suies, oxydation, cendres), avec ν_{Char} = 0,338, ν_{cendres} = 0,033, et ν_{suies} = 0,05 [47].

L'équation (4.4) représente l'équation de conservation de la masse globale. L'équation (4.5) représente la variation du volume durant la combustion de la surface du charbon en considérant que la variation de volume est négligeable pendant la déshydratation et la pyrolyse.

L'équation (4.6) permet d'évaluer la température de la phase solide, où $\mathrm{Q}_{+/-}^{(\mathrm{s})}$ est l'énergie échangée par convection et rayonnement avec la phase gazeuse.

$\Delta h_{\mathrm{H_2O}}$, Δh_{pyr} et Δh_{Char} sont les enthalpies de vaporisation, de pyrolyse et de combustion du charbon :

Δh_{H_2O} = 2,25×10^3 kJ kg^{-1} ; Δh_{pyr} = 418 kJ kg^{-1} ; Δh_{Char} = -12×10^3 kJ kg^{-1} (réaction exothermique), en considérant que 50 % des réactions de combustion hétérogènes se produisent à la surface du solide d'où α est fixée à 0,5 (4.6).

Dans un premier temps, l'évaporation se déroule en une transformation isotherme lorsque la T_s atteint 373 K :

$$\dot{\omega}_{H_2O} = \begin{cases} 0 \text{ pour } T_s \neq 373 \text{ K} \\ \frac{Q_{+/-}}{\Delta h_{H_2O}} \text{ pour } T_s = 373 \text{ K} \end{cases} \quad (4.7)$$

Après le séchage du solide, sa température continue à augmenter pour atteindre 400 K où la phase de pyrolyse se déclenche. La température de solide continue à augmenter pendant cette phase jusqu'à atteindre 500 K et reste constante jusqu'à la fin de cette étape. L'énergie reçue $Q_{+/-}$ par le solide et qui contribue à la pyrolyse est calculée par l'équation suivante :

$$\dot{\omega}_{Pyr} = \frac{Q_{+/-}}{\Delta h_{Pyr}} \times \frac{T_S - 400}{500 - 400} \quad (4.8)$$

Pendant la pyrolyse, le solide se transforme en produits gazeux (CO et CO_2) et en charbon. La transformation suit l'équation suivante :

$$\text{Bois sec} \rightarrow (\nu_{Char} - \nu_{Suies})\ \text{Char} + \nu_{Suies}\ \text{suies} + \nu_{CO_2}\ CO_2 + \left(1 - \nu_{Char}\nu_{CO_2}\right)\ CO$$

Le taux de production du charbon est supposé égal à la différence entre le taux de pyrolyse et la perte due à la production des suies.

L'oxydation du carbone se produit par différentes réactions homogènes (4.9) ou hétérogènes (4.10) :

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (4.9)$$

$$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO,\ CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 \quad (4.10)$$

Le taux d'oxydation de la surface suit la loi cinétique suivante :

$$\dot{\omega}_{s,\mathrm{Char}} = \frac{1}{\nu_{O_2}} k_{\mathrm{Char}} \beta_g \rho_g \; Y_{\mathrm{O}_2} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{Char}}}{R_0 T_S}\right) \beta s \tag{4.11}$$

Avec Y_{O_2} est la fraction de masse de O_2 à la surface du solide.

La fréquence $k_{\mathrm{Char}} = 254{,}2\ \mathrm{kgm^{-2}\ s^{-1}\ atm^{-1}}$ et l'énergie d'activation $E_{\mathrm{Char}}/R_0 = 9000\ \mathrm{K}$ sont évalués expérimentalement [125], ν_{O_2} est la masse de l'oxygène, β_g, β sont les fractions volumiques des gaz de pyrolyse et du solide respectivement, et ρ_g est la masse volumique des gaz de pyrolyse.

IV.2.2 Modélisation de la phase gazeuse

L'évolution du comportement de la phase gazeuse est présentée par l'ensemble des équations différentielles de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et des espèces chimiques. L'écoulement est considéré turbulent dans certaines régions du domaine surtout tout autour de la flamme et dans la zone de combustion. Or, l'écoulement peut être à faible turbulence à proximité d'un mur (végétation) ou à l'intérieur d'un sillage. Ainsi, pour prendre en compte la contribution de cette fluctuation du régime de l'écoulement dans les équations de conservation de masse, d'énergie et de quantité de mouvement, le modèle de turbulence utilisé est basé sur une méthode statistique normalisée RNG (k-ε) à deux équations de transport correspondant à l'énergie cinétique de l'écoulement et son taux de dissipation [215,216] qui sont filtrées à l'aide de la moyenne de Favre [214].

La moyenne de Favre permet de présenter chaque variable Φ (masse volumique, vitesse, enthalpies, fraction massique) des équations de transport par la somme de sa valeur moyenne et de la fluctuation : $\Phi = \widetilde{\Phi} + \Phi''$, avec :

$$\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{D}t}(\Phi) = \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \Phi\, \widetilde{u_j}}{\partial x_j} \tag{4.12}$$

Après le traitement numérique, les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie moyennes sont décrites par les relations suivantes [47,213]:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = \sum_{\alpha,k} \overline{M_{s,\alpha}^{k}} \tag{4.13}$$

$$\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{D}t}(\bar{\rho}\tilde{u}_i) = \overline{\frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_g \sigma_{ij})} - \overline{\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u''_j u''_i)} + \bar{\rho} g_i - \overline{F_{s,i}^{k}} \tag{4.14}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{h}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\bar{q}_j - \overline{\frac{\partial}{\partial x_j}(u'_j h'')} - \overline{Q_{\mathrm{Conv}}^{k}} + \overline{\beta_g \sigma_g (J - 4BT_g^4)} \tag{4.15}$$

$$\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{D}t}(\bar{\rho}\tilde{Y}_\alpha) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho D \frac{\partial \widetilde{Y_\alpha}}{\partial x_j}\right) - \overline{\frac{\partial}{\partial x_j}(u''_j Y''_\alpha)} + \bar{\omega}_\alpha + \overline{M_{s,\alpha}^{k}} \tag{4.16}$$

$M_{s,\alpha}^{k}$ représente la masse de l'espèce chimique α échangée entre la phase solide *k* et gazeuse, β_g est la fraction volumique de la phase gazeuse, σ_g est le coefficient d'extinction du mélange gazeux et des suies. σ_{ij} est la tenseur de pression, $\bar{\omega}_\alpha$ est le taux de destruction/formation d'une espèce chimique α durant une combustion homogène et Q_{Conv}^{k} est l'énergie convective échangée entre la phase gazeuse et le solide. $F_{s,i}^{k}$ est la force de trainée du composant *i* due à l'interaction entre le fluide et les particules solides du lit de combustible.

La force de trainée est donnée par :

$$\overline{F_{s,i}^{(k)}} = \rho C_D \frac{s\beta}{2} \left\| \widetilde{U} \right\| \widetilde{u_i} \tag{4.17}$$

où C_D est le coefficient de trainée des particules solides, sa valeur est estimée à 0,15 [223]. q_j est le flux de transfert de chaleur par conduction, J est le rayonnement incident total, T_g est la température du gaz et B est la constante de Stefan-Boltzmann.

IV.2.3 Modèle de turbulence RNG (k - ε)

Le phénomène de la combustion assure un apport d'énergie continu à l'écoulement, d'où son caractère assez dissipatif. Ainsi, l'énergie interne du fluide augmente dû au cisaillement

entrainé par le tenseur visqueux. La turbulence est un phénomène tridimensionnel aléatoire résolu normalement par des méthodes statistiques. La méthode introduite dans FireStar2D est basée sur « Eddy viscosity concept » : *k*- ε [215,216]. Ce modèle repose sur l'analogie entre le transport de quantité de mouvement et la théorie cinétique des gaz. Il est caractérisé par deux termes, le premier est relié à l'énergie cinétique de turbulence *k* et le second est le taux de dissipation ε. Le système d'équations de ce système est représenté par [219]:

$$\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{D}t}(\bar{\rho}k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_{eff}}{P_{rT}}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + P + W - \rho\varepsilon + \rho c_D \frac{\beta s}{2}\left[\widetilde{U^3} - 4\breve{U}k\right] \tag{4.18}$$

$$\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{D}t}(\bar{\rho}\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_{eff}}{P_{rT}}\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right) + C_{\varepsilon 1}\frac{P}{T} + C_{\varepsilon 3}\frac{W}{T} - \rho(C_{\varepsilon 2} + R)\frac{\varepsilon}{T} + \rho c_D \frac{\beta s}{2}\left[\frac{3}{2}\widetilde{U^3} - 6\widetilde{U}\varepsilon\right] \tag{4.19}$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} f_\mu \tag{4.20}$$

$$f_\mu = \exp\left[-\frac{2{,}5}{1+0{,}02Re_T}\right] \tag{4.21}$$

avec $\mathrm{T} = \max(\tau_t, C_T\,\tau_\eta)$, $\tau_t = \frac{K}{\varepsilon}$ est l'échelle du temps de turbulence, C_T = 6, et τ_η est l'échelle de temps de Kolmogorov définie par :

$$\tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2} \tag{4.22}$$

P et *W* sont les taux de production d'énergie cinétique turbulente par cisaillement et par dilatation respectivement, définies par :

$$P = -\overline{\rho u_i'' u_j''}\frac{\partial \widetilde{u_i}}{\partial x_j} \tag{4.23}$$

$$W = -\frac{\mu_t}{\overline{\rho^2}}\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j}\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} \tag{4.24}$$

Les constantes utilisées sont :

$$C_{\varepsilon 1} = 1{,}42\ ;\ C_{\varepsilon 2} = 1{,}68\ ;\ C_{\varepsilon 3} = 1{,}5\ ;\ C_\mu = 0{,}085$$

Le nombre de Prandlt turbulent est calculée par :

$$\left|\frac{\alpha_T - 1{,}3929}{\alpha - 1{,}3929}\right|^{0{,}6321} \times \left|\frac{\alpha_T + 2{,}3929}{\alpha + 2{,}3929}\right|^{0{,}3679} = \frac{\mu}{\mu_T} \tag{4.25}$$

avec $\alpha_T = 1/\mathrm{Pr}_T$

La contribution de la force de traînée, induite par la végétation, à l'énergie turbulente cinétique est introduite aux équations (4.17) et (4.18) à travers le coefficient de traînée C_D. Le terme R additionnée à l'équation de transport de ε provient de la normalisation (RNG) adoptée à la modélisation de l'écoulement turbulent [216,224].

$$R = \frac{\eta\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1+\beta_k\eta^3} \tag{4.26}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{C_\mu \overline{\rho}\epsilon}} \tag{4.27}$$

avec η_0 = 4,38, et où η est la fraction massique des particules du combustible brûlé et β_k= 0,015.

Cette amélioration du modèle de turbulence $k-\varepsilon$ permet l'application de ce modèle aux écoulements à faible turbulence, par exemple à proximité des bords où les conditions de l'écoulement turbulent ne sont ni homogènes, ni isotropes. Le terme f_μ permet de montrer l'amortissement des tourbillons visqueux. Ce terme est défini à l'aide du nombre de Reynolds turbulent :

$$\mathrm{Re}_T = \rho K^2/(\mu\varepsilon) \tag{4.28}$$

IV.2.4 Le modèle « Eddy Dissipation Concept » (EDC)

La réaction entre les produits de pyrolyse issus de la dégradation de la végétation et l'air ambiant est suffisamment rapide pour que le taux de réaction soit considéré quasi infini, alors qu'il est contrôlé par des tourbillons de petite échelle qui ont lieu dans la zone du mélange des différentes espèces chimiques. Ainsi, le taux de réaction est limité par deux facteurs essentiels : la fraction massique des espèces chimiques et le temps nécessaire au mélange des gaz de pyrolyses avec l'air ambiant. Ces considérations ont aidé à construire le modèle de combustion EDC, « Eddy Dissipation Concept » [218].

La composition du mélange gazeux produit par la combustion, à une température de 1000 K, est identifiée à l'aide d'une analyse de thermo-gravimétrie (TGA) par le mélange suivant : CO, CO_2, H_2O, CH_4 et des très petites proportions de CH_2 et C_2H_6 [125]. Pour simplifier le problème, le mélange gazeux est considéré constitué de CO, CO_2, H_2O, CH_4 et N_2.

Le taux de réaction est donné par le rapport suivant :

$$\overline{W_s^{EDC}} = \frac{C_A \bar{\rho}}{\tau_{\text{mix}}} \times \min\left(Y_s, \frac{Y_{O_2}}{\nu}\right) \tag{4.29}$$

Avec Y_s et Y_{O_2} les fractions volumiques du combustible et de l'oxygène respectivement, ν le coefficient stœchiométrique de la réaction et le paramètre C_A une fonction du nombre de Reynolds turbulent donné par:

$$C_A = \frac{23{,}6}{\text{Re}_T^{1/4}} \frac{\chi}{1-\chi y^*} \tag{4.30}$$

y^* est la fraction volumique des structures turbulentes de petite échelle et χ est la fraction occupée par la réaction à l'intérieur de ces structures, avec

$$\chi = \frac{Y_{\text{pro}}/(1+\nu)}{\nu_\lambda [Y_s + Y_{\text{pro}}/(1+\nu)]} \tag{4.31}$$

$$\nu_\lambda = \frac{2{,}13}{\text{Re}_T^{3/4}} \tag{4.32}$$

D'une autre part, pour les régions caractérisées par un écoulement turbulent semi-développé le taux de réaction moyenne est calculée par la loi cinétique d'Arrhenius [225] :

$$\overline{W_s} = -\min\left(\overline{W_s^{EDC}}, W_s^{Ar}\right) \tag{4.33}$$

avec

$$W_s^{Ar} = \rho^2 Y_s Y_{O_2} K_{Ar} \exp\left(\frac{-E_{Ar}}{RT}\right) \tag{4.34}$$

$K_{Ar} = 7\times10^4$ m^3 kg^{-1} s^{-1} et $E_{Ar} = 6.651\times10^4$ J mol^{-1}.

Le temps du mélange dans FireStar2D est évalué grâce au temps caractéristique de l'écoulement turbulent donné par :

$$\tau_{\text{mix}} = \frac{K}{\varepsilon} \tag{4.35}$$

IV.2.5 Modèles des transferts thermiques convectifs et radiatifs

Les flux thermiques convectifs et radiatifs jouent un rôle important dans le bilan énergétique de la combustion. Ainsi, les contributions énergétiques sont dues aux différents modes de transfert thermique qui ont lieu entre les gaz chauds, la flamme et le combustible non brûlé.

IV.2.5.1 Modélisation du flux radiatif

En effet, le rayonnement représente jusqu'à 30 % de l'énergie dégagée par la combustion [226].

L'énergie échangée par rayonnement est évaluée à l'aide de l'intégration de l'équation de transfert radiatif, en tenant en compte des émissions venant des braises, du mélange gazeux et des particules des suies produites dans la flamme [125,227] :

$$Q_{\text{rad}}^{(s)} = \frac{s\beta}{4}[J - 4\sigma T_s^4] \tag{4.36}$$

L'expression $\frac{s\beta}{4}$ représente le coefficient d'extinction du solide [228].

Le rayonnement incident total *J* est calculé par la relation suivante :

$$J = \int_0^{4\pi} I \, d\Omega \tag{4.37}$$

avec *I* l'intensité radiative dans la direction $\vec{\Omega}$, qui peut être évalué en résolvant l'équation de transfert radiatif (ETR) multiphasique :

$$\Omega_j \frac{\partial}{\partial x_j}\left(s_g J\right) = \frac{s\beta}{4}\left[\frac{\sigma {T_s}^4}{\pi} - I\right] + s_g \beta_g \left[\frac{\sigma T^4}{\pi} - I\right] \tag{4.38}$$

La résolution de l'équation ETR est réalisé à l'aide de la méthode des ordonnées discrètes [229] qui est adaptée à la résolution du problème de transfert radiatif dans des milieux qui présentent des variations importantes du coefficient d'absorption.

La radiation provenant de la flamme est principalement causée par les particules de suie produites [230] qui donnent à la flamme un couleur jaunâtre. En considérant que les particules de suie sont assimilées à des carbones sphériques de diamètre d_{suies} = 1 µm, le champ des particules de suie est évalué à travers l'équation de transport appliquée à sa fraction volumique donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\bar{\rho}\overline{f_v}\right) + \frac{\partial}{\partial t}\left(\bar{\rho}\overline{f_v}\overline{u_j}\right) = -\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\overline{f_v}\overline{u_j^{th}}\right) + \bar{\rho}\widetilde{\dot{w}_{f_v}} \tag{4.39}$$

$$\widetilde{\dot{w}_{f_v}} = \frac{1}{\rho_{\text{suies}}}\left[\nu_{\text{suies}}\widetilde{\dot{w}_{\text{pyr}}} - W_{ox}\tilde{f}_v s_{\text{suies}}\right] \tag{4.40}$$

avec $s_{\text{suies}} = 6/d_{\text{suies}}$ qui est le rapport surface volume des particules de suie. Le transport des suies est assuré à travers du mouvement convectif des gaz avec une vitesse u_j défini par :

$$u_j^{th} = -0{,}54\frac{\overline{\mu_g}}{\overline{\rho_g}}\frac{\partial \ln \bar{T}_g}{\partial x_j} \tag{4.41}$$

W_{ox} correspond à l'oxydation des suies, évalué par la formule suivante [231] :

$$W_{ox} = 120\left[\frac{K_A P_{O_2}}{1+K_Z P_{O_2}}\chi + P_{O_2}(1-\chi)\right] \tag{4.42}$$

$$\chi = \frac{1}{1+\frac{K_T}{K_B P_{O_2}}} \tag{4.43}$$

P_{O_2} est la pression partielle de O_2. Les différents taux de réaction K_A, K_B, K_T, K_Z sont fonction de la température [231] et évalués par :

$$K_A = 20\exp\left(-\frac{30000}{R\tilde{T}}\right) \text{ g cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{ atm}^{-1} \tag{4.44}$$

$$K_B = 4{,}46\,.\,10^{-3}\exp\left(-\frac{15200}{R\tilde{T}}\right) \text{ g cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{ atm}^{-1} \tag{4.45}$$

$$K_T = 1{,}15\,.\,10^{5}\exp\left(-\frac{97000}{R\tilde{T}}\right) \text{ g cm}^{-2}\text{ s}^{-1} \tag{4.46}$$

$$K_B = 21{,}3\exp\left(\frac{4100}{R\tilde{T}}\right) \text{atm}^{-1} \tag{4.47}$$

IV.2.5.2 Modélisation du flux convectifs

Le flux de chaleur convectif entre la phase gazeuse et le solide est défini par :

$$Q_{\text{conv}}^{(s)} = h_{\text{conv}} s\, \beta [T - T_s] \tag{4.48}$$

Le coefficient de transfert de chaleur h_{conv} est approximé grâce à une corrélation empirique évaluant un écoulement laminaire ou turbulent autour d'un cylindre et déterminé par [232] :

$$h_{\text{conv}} = \frac{K}{D} C\ \text{Re}_D^m\ \text{P}_\text{r}^{1/3} \tag{4.49}$$

Les valeurs de *C* et *m* dépendent du nombre de Reynolds.

IV.3 Méthode de résolution numérique

IV.3.1 Création du maillage du domaine

Le système des équations de transport différentielles modélisant le comportement physique du mélange gazeux (équations (4.13), (4.14), (4.15) et (4.16)), fermé par les deux équations du modèle turbulent (*RNG – k-ε*) ((4.18) et (4.19)) est résolu dans un système de coordonnées cartésiennes à l'aide de la méthode des volumes finis.

La méthode des volumes finis nécessite la division du domaine bidimensionnel en grilles décalées selon un dimensionnement bien choisi. En effet, la dimension des mailles doit assurer une représentation optimale des structures cohérentes observées durant un feu. En plus, afin d'éviter l'extinction du feu surtout pour un régime de propagation à vent faible où le rayonnement joue un rôle important dans la propagation des feux, il est nécessaire de respecter un critère sur la dimension des mailles :

$$\text{Max}(\Delta x, \Delta z) \quad < \quad \delta = \frac{4}{\sum_k s_S^k \beta_S^k} \tag{4.50}$$

où δ est le coefficient d'extinction correspondant à la famille de végétation *k*.

Ce critère assure des calculs précis des transferts radiatifs à l'intérieur de la végétation. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations sur les cellules composant le domaine de calcul en utilisant une technique de grilles décalées. En effet, les différents scalaires

sont stockés au milieu des cellules sauf la vitesse. Elle est définie au point milieu de la face des cellules (Figure 4.1). Cette technique permet d'éviter les solutions dites en « zigzag » pour les champs de pression et de vitesse [233,234].

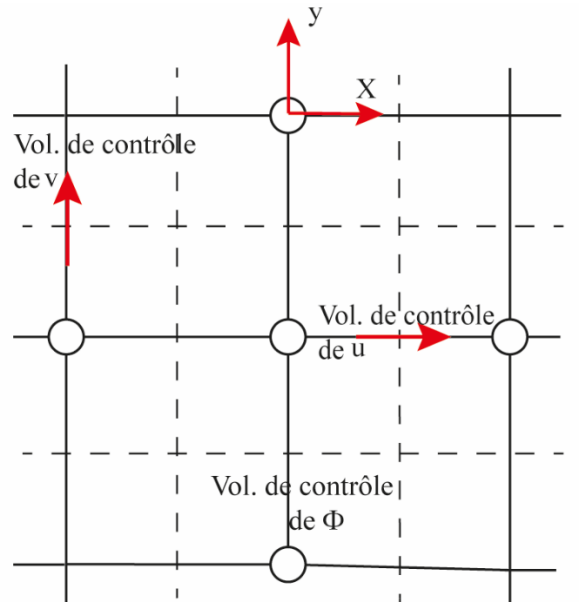


Figure 4.1 *Grilles décalées des scalaires et des composantes de vitesse.*

Par rapport à la phase solide, le domaine est divisé en un nombre de cellules déterminé en utilisant un maillage rectangulaire. Les tailles de maille doivent respecter le critére (4.50). Afin de réduire le temps de calcul, un système de maillage adaptatif est utilisé [235]. Cette méthode consiste à localiser le point du lit de combustible caractérisé par un gradient de fraction massique de la phase solide maximal. Cette zone correspond au front de dégradation massique du combustible. Si cette position a dépassé une valeur bien choisie, un nouveau maillage plus raffiné est généré entre les deux bords de cette zone. Les derniers résultats obtenus pour le pas de temps précédant sont projetés sur le nouveau maillage en utilisant une interpolation bilinéaire [236].

IV.3.2 Séquence de calcul

Dans un premier temps, le maillage est créé, les conditions aux limites sont imposées, les variables sont initialisées (t = 0). Les profils de vitesse et de pression sont introduits. La boucle de temps débute suivant : $t_n = t_{n-1} + dt_n$. La séquence de calcul est la suivante :

1. Résolution des fractions massiques des composants chimiques (CO, O_2, CO_2, H_2O, N_2)
2. Résolution de la fraction volumique des suies.
3. Résolution de l'ETR par la méthode des ordonnées Discrètes [229] : cette méthode consiste à discrétiser l'intensité radiative en un nombre infini de directions, suivant les lesquels l'ETR est résolue afin d'obtenir en tout point du domaine une valeur de luminance. La somme des luminances permet de calculer l'intensité locale du flux radiatif. Ensuite, les champs de luminance sont calculés selon chaque direction.
4. Les équations de conservations décrivant l'évolution de la phase solide sont résolues à l'aide de la méthode Runge-Kutta d'ordre 4.
5. Calcul du champ de température à partir de l'enthalpie (données de CHEMKIN). Ensuite, les propriétés thermophysiques sont calculées.
6. Calcul des grandeurs de turbulence (champs de k et ε)
7. Résolution des équations de Navier-stokes permettant de déterminer les composantes de la vitesse et du pression dynamique. Le couplage vitesse-pression est traité à l'aide de l'algorithme PISO [237].
8. Calcul des résidus.

IV.3.3 Résolution des équations : Méthode des volumes finis

Les équations de transport de la phase gazeuse (4.13) ;(4.14) ; (4.15) ; (4.16) ; (4.18) et (4.19) peuvent être écrites de la façon suivante [238] :

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}.\left(\rho u_i \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}\right) = S_\Phi \qquad (4.51)$$

Φ est la variable, u_i est la vitesse normale , Γ_Φ est le coefficient de diffusion et S_Φ est le terme source.

Soit :

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = S_\Phi \qquad (4.52)$$

J_i représente les flux convectifs et diffusifs sur les faces du volume de contrôle.

$$J_x = \left(\rho u_x \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}\right) \text{ et } J_y = \left(\rho u_y \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}\right) \qquad (4.53)$$

En intégrant sur un volume de contrôle δΩ : (Figure 4.2)

$$\rho^{n+1}\Phi_p^{n+1} - \rho^n \Phi_p^n + (J_e - J_w) + (J_n - J_s) = S_\Phi \, \delta\Omega \qquad (4.54)$$

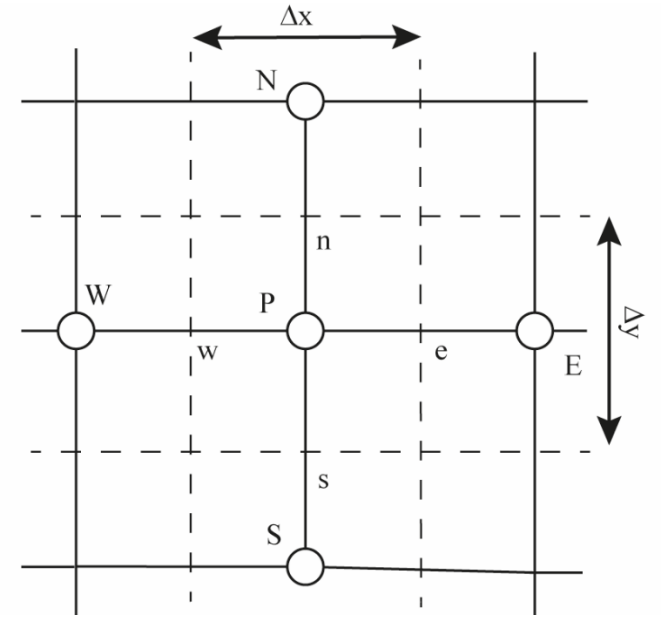


Figure 4.2 *Notation du volume de contrôle.*

De la même façon, on obtient l'équation de continuité :

$$(\rho^{n+1} - \rho^n) + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) = 0 \tag{4.55}$$

où F_i sont les flux de masses à travers les faces des volumes.

En multipliant (4.54) par Φ_p et en soustrayant (4.53), on obtient :

$$\rho^n{}_p\left(\Phi^{n+1} - \Phi^n\right)\frac{\delta\Omega}{\delta t} + \left(J_e - F_e\Phi_p\right) - \left(J_w - F_w\Phi_p\right)$$

$$+\left(J_n - F_n\Phi_p\right) - \left(J_s - F_s\Phi_p\right) = S_\Phi\,\delta\Omega \tag{4.56}$$

Une réduction de l'équation (4.56) en une équation algébrique après sa discrétisation temporelle d'ordre 2 :

$$\left[3(\rho_p\Phi_p)^{n+1} - 4(\rho_p\Phi_p)^n + (\rho_p\Phi_p)^{n-1}\right]\frac{1}{2}\frac{\delta\Omega}{\delta t}$$

$$+(J_e) - (J_w) + (J_n) - (J_s) = S_\Phi^{n+1}\,\delta\Omega \tag{4.57}$$

où : $J_i = \left[\rho u_i\Phi_i - \Gamma_\Phi\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_j}\right)_i\right]^{n+1}\delta_i$, avec δ_i la largeur de la maille et i = *e*, *w*, *n* et *s* (Figure 4.2).

Chapitre V. Étude des feux marginaux à plat et sans vent

La réussite des feux marginaux dépend du couvert végétal, des conditions météorologiques et de la configuration du terrain. Pour de tels feux, de petites variations de ces conditions peuvent conduire à leur extinction. Les modèles qui permettent de prédire la réussite ou l'échec d'un feu marginal sont rares. La plupart des modèles sont statistiques, basés sur des travaux expérimentaux et donc spécifiques à une configuration bien déterminée [19,143,172,181]. En 2014, Balbi *et al*. [141] ont proposé un critère semi-physique de non-propagation des feux à plat et sans vent, relié à la teneur en eau de la végétation et applicable pour tous les types des combustibles. Cependant, ce critère n'avait jamais été testé jusqu'à présent.

Ainsi, le premier objectif du travail rapporté dans ce chapitre fut de tester expérimentalement à l'échelle du laboratoire ce critère semi-physique de non-propagation d'un feu marginal, lié à la teneur en eau sous des conditions particulières, à plat et sans vent. Le second objectif fut d'identifier le seuil d'extinction de cette teneur en eau, appelé aussi valeur critique, au-delà duquel le feu s'éteint. Ce seuil d'extinction dépendant fortement des propriétés de la végétation et de la température ambiante. Cette validation expérimentale a été réalisée

grâce à des feux menés à l'Université de Corse au sein de l'UMR SPE 6134, avec un combustible homogène de type frisure de bois. Des données tirées de la littérature [19,181,182] rapportant des feux marginaux pour des végétations de type litières homogènes forestières et également des végétations hétérogènes de type chaparral ont été confrontées au modèle théorique. Afin de tester le modèle à l'échelle du terrain, des simulations numériques ont été réalisées avec un modèle physique complet, dénommé FireStar2D [18,209,239], pour des combustibles homogènes (herbes) et également hétérogènes (maquis).

Le second objectif de ce travail fut d'étudier l'influence des propriétés des végétaux (charge surfacique, LAI) sur la propagation des feux et sur la teneur en eau d'extinction.

L'influence de la vitesse du vent sur le seuil d'extinction a été aussi évaluée numériquement pour des vents faibles. Ceci a permis de déterminer un domaine d'utilisation de la formule semi-physique en se fixant préalablement une erreur acceptable.

V.1 Étude à l'échelle du laboratoire

Cette partie présente des expériences à l'échelle du laboratoire menées lors des campagnes expérimentales à l'Université de Corse au sein de l'UMR SPE 6134 avec la frisure de bois et détaillées dans le chapitre 3 mais également des expériences tirées de la littérature [19,181,182].

Le but de cette étude est donc, dans un premier temps, de tester expérimentalement le critère de non-propagation tiré du modèle semi-physique proposé par Balbi *et al*. en 2014 [141] dans une configuration particulière (à plat et sans vent).

Une étude de l'influence de la teneur en eau du combustible sur la dynamique du feu est également présentée afin de vérifier que les résultats présentés et obtenus lors de travaux antérieurs sont similaires à ceux de nos expériences. Pour cela, le modèle semi-physique permettant d'évaluer le ROS à plat et sans vent [131,188] est utilisé ainsi que FireStar2D.

V.1.1 Présentation des différentes configurations étudiées

V.1.1.1 Tests expérimentaux menés aux laboratoires de l'université de Corse

Les expériences réalisées au laboratoire UMR CNRS 6134 SPE de l'Université de Corse ont été réalisées à plat et sans vent en utilisant de la frisure de bois comme combustible. Les caractéristiques du combustible sont données par le tableau 3.1. Dans un premier temps, le but de ces expériences est de retrouver l'influence de la teneur en eau sur la vitesse de propagation des feux puis de déterminer la valeur limite de cette teneur au-dessus de laquelle le feu ne peut plus se propager.

Ainsi, trois séries de tests avec trois charges surfaciques différentes ont été (0,15 ; 0,2 ; et 0,4 kg m^{-2}) mises en œuvre. Les résultats expérimentaux obtenus sont systématiquement confrontés à ceux fournis par les modèles théoriques (semi-physique, le modèle empirique de Wilson, FireStar2D).

V.1.1.2 Tests expérimentaux menés par Wilson

Wilson a mené une campagne de 471 expériences avec des conditions marginales. Le combustible était soit de la litière forestière soit de la frisure de bois. Ces expériences avaient pour but d'identifier la zone de propagation marginale, c'est-à-dire les valeurs de la teneur en eau pour lesquelles le feu est susceptible de propager ou non. Un indice d'extinction a été ainsi déterminé qui relie le seuil d'extinction au Leaf Area Index (LAI) de la végétation :

$$m_x = 0{,}25 \times \ln(4 \times LAI) \qquad (5.1)$$

Pour plus de détails, les procédés expérimentaux, les conditions de propagation et les propriétés des combustibles peuvent être consultés au chapitre II § 2.5.

V.1.1.3 Tests expérimentaux menés par Weise

Weise a réalisé 240 tests de brûlage [142,181,182] en utilisant les branches et les feuilles de quatre espèces de chaparral : *Adenostoma fasciculatum* (chamise), *Ceanothus crassifolius* (ceanothus), *Arctostaphylos glandulosa* (manzanita), et *Quercus berberidifolia* (Chêne). Le but principal des expériences fut de prédire la réussite de la propagation d'un feu marginal en fonction du vent, de la pente, de la teneur en eau et de la charge surfacique du combustible. Ainsi, deux vitesses de vent (0 et 2 m s^{-1}), deux profondeurs de lit de combustible (20 et 40 cm) et trois pourcentages de pente (0 %, 40 % ou 70 %) ont été utilisés. La teneur en eau *m*, calculée par rapport au combustible sec, varie entre 29 % et 105 %. Soixante-cinq des 115 feux ont réussi à se propager sur toute la longueur du domaine où était placé le combustible (2,0 m).

Pour notre étude, 71 des 240 tests de brulages ont été sélectionnés. Ces expériences correspondent à des propagations sous conditions de pente et de vent nul. Lors de ces tests, la fraction volumique a varié entre 2,5 x 10^{-3} à 4,39 x 10^{-3}, le rapport surface-volume entre 7,2 à 103 m^{-1} et la teneur en eau des combustibles a varié entre 9 % et 106 %. Weise a ainsi proposé une modification de la formule empirique de Wilson (5.1) afin qu'elle soit applicable aux végétaux de type chaparral :

$$m_x = 0{,}2 \times \ln(4 \times LAI) \qquad (5.2)$$

V.1.2 Comparaison des résultats expérimentaux avec l'approche semi-physique, FireStar2D et la loi de Wilson

Dans ce paragraphe, une confrontation entre les tests expérimentaux réalisés à l'échelle du laboratoire au sein de l'Université de Corse, le modèle semi-physique, FireStar2D et le modèle empirique de Wilson est présentée.

V.1.2.1 Influence de la teneur en eau sur la dynamique du feu

Comme il est mentionné dans le chapitre II § 2.2, la teneur en eau de la végétation est considérée comme le facteur le plus influent sur la dynamique des feux de forêts [18,26,144]. Elle impacte d'une manière directe l'intensité du feu [103] la quantité de combustible brûlé et donc la vitesse de propagation du front de la flamme [18,26]. De plus, elle entraîne une diminution de la température de la flamme et la diminution de la quantité d'oxygène dans la zone de combustion [103]. Ainsi l'augmentation de la teneur en eau du combustible peut conduire à ce qu'un feu perde sa capacité à propager.

L'influence de *m* sur la dynamique du feu est étudiée grâce à 27 tests menés sur de la frisure de bois à l'échelle du laboratoire. Pour cette étude, une charge surfacique du végétal de 0,2 kg m^{-2} et une épaisseur de 0,08 m sont maintenues constantes durant les différents brûlages. La teneur en eau varie entre 0 et 75 %.

Dans un premier temps l'influence de la teneur en eau de la végétation sur le ROS est confirmée. Pour cela, les résultats obtenus sont confrontés au modèle semi-physique et à FireStar2D. L'effet de la teneur en eau est montrée grâce au rapport ROS/ROS(0), qui représente le rapport de la vitesse de propagation pour respectivement une teneur en eau donnée et nulle (Figure 5.1) [18] .

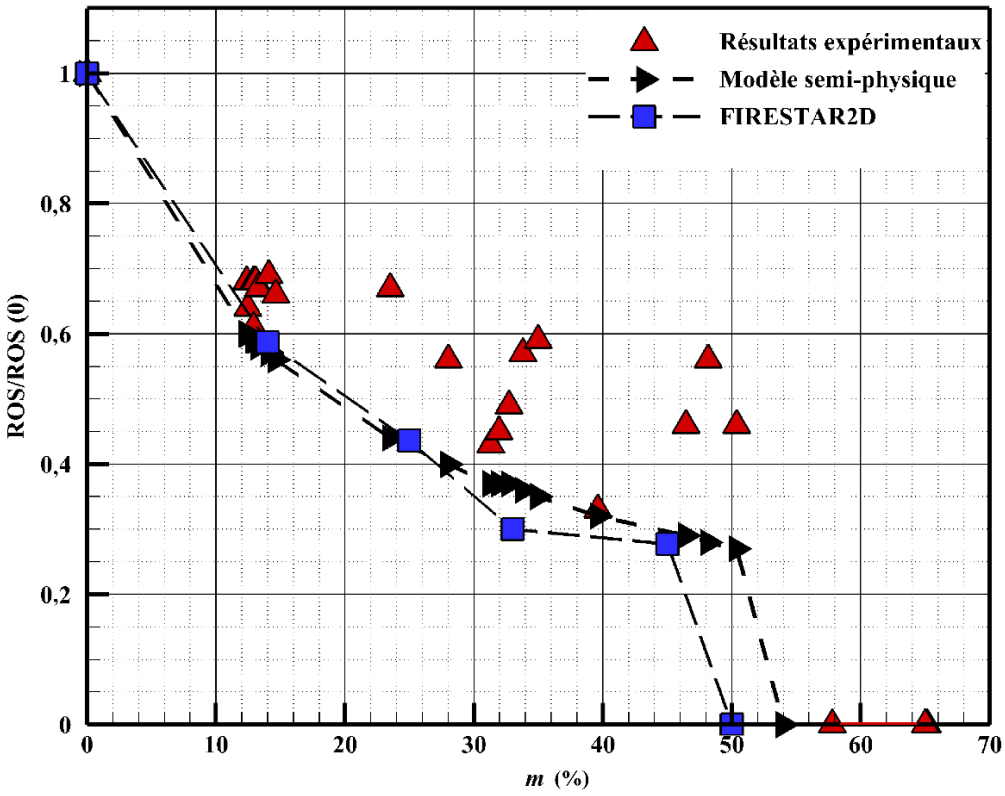


Figure 5.1 *Variation du rapport ROS/ROS (0), à plat et sans vent en fonction de la teneur en eau pour un lit de frisure de bois de 8 cm d'épaisseur.*

Comme le montre les courbes de la figure 5.1, les modèles théoriques confirment bien les résultats de la littérature [18,144,171] et montrent une allure décroissante du ROS/ROS(0) en fonction de *m*. La figure 5.1 confirme que le modèle semi-physique est en accord avec les résultats expérimentaux et également FireStar2D. Il est à noter que le modèle semi-physique de propagation fournissant le ROS pour un vent et une pente nuls a été validé dans un travail antérieur [141] en utilisant des expériences à l'échelle du laboratoire réalisées par Rossa [240] pour les combustibles suivants : Eucalyptus, frisure de bois et *Pinus pinaster*. Il est à noter également que de nombreux travaux avancent une décroissance exponentielle du rapport ROS/ROS(0) en fonction de *m* [174,241–243]. D'autres études suggèrent que cette décroissance exponentielle n'est valable que pour des *m* inférieures à 12 %, et que cette relation devient linéaire pour des valeurs de *m* plus importantes [170] .

La figure 5.1 suggère que la variation du ROS en fonction de *m* pourrait être divisée en 3 zones :

- Zone (1) : pour des faibles valeurs de $m < 10 – 15$ %, une décroissance linéaire rapide de ROS. En effet, la courbe montre que lorsque *m* augmente de 0 à 15 % le ROS perd entre 30 et 45 % de sa valeur initiale.
- Zone (2) : une décroissance linéaire moins rapide lorsque $15\ \% < m < 45 – 50$ %.
- Zone (3) : le ROS tend vers zéro pour une *m* d'environ 50 %.

La décroissance du ROS engendrée par une augmentation de *m* peut être justifiée par un prolongement du temps de combustion des particules dû à un temps de préchauffage plus important et une diminution de la concentration des gaz de pyrolyse par dilution de l'oxygène présent dans la zone de combustion à cause de la production de la vapeur d'eau. Plusieurs études viennent appuyer cette justification en montrant une augmentation du temps d'ignition des particules suite à une teneur en eau plus importante [41,176,244].

De plus, Wilson [245] a proposé une formule pour quantifier l'énergie nécessaire pour l'ignition du végétal :

$$Q_T = Q_f + m\, Q_M \tag{5.3}$$

avec Q_f l'énergie nécessaire pour augmenter la température d'une unité du combustible sec de la température ambiante jusqu'au 400 °C (fin de la pyrolyse), et Q_M l'énergie nécessaire pour augmenter la température d'une unité d'eau jusqu'au 100 °C et de la vaporiser par la suite.

Cette formule montre que l'augmentation de *m* engendre ainsi l'augmentation de l'énergie nécessaire à l'ignition, et donc une augmentation du temps d'ignition, une diminution de la température de la flamme et finalement de la puissance fournie par le feu. La figure 5.2 illustre la variation de la puissance de feu en fonction de temps pour des valeurs de teneur en eau (0 % ; 14 % ; 30 % et 51 %) pour les tests expérimentaux réalisés au laboratoire de l'Université de Corse sur un lit de frisure de bois d'épaisseur 8 cm. Les résultats sont obtenus

grâce à une analyse des fumées aspirées par un calorimètre couplé à un analyseur de gaz IRTF qui permet de mesurer l'évolution des gaz de combustion (CO, CO_2 et O_2) tout au long de la dégradation thermique du combustible.

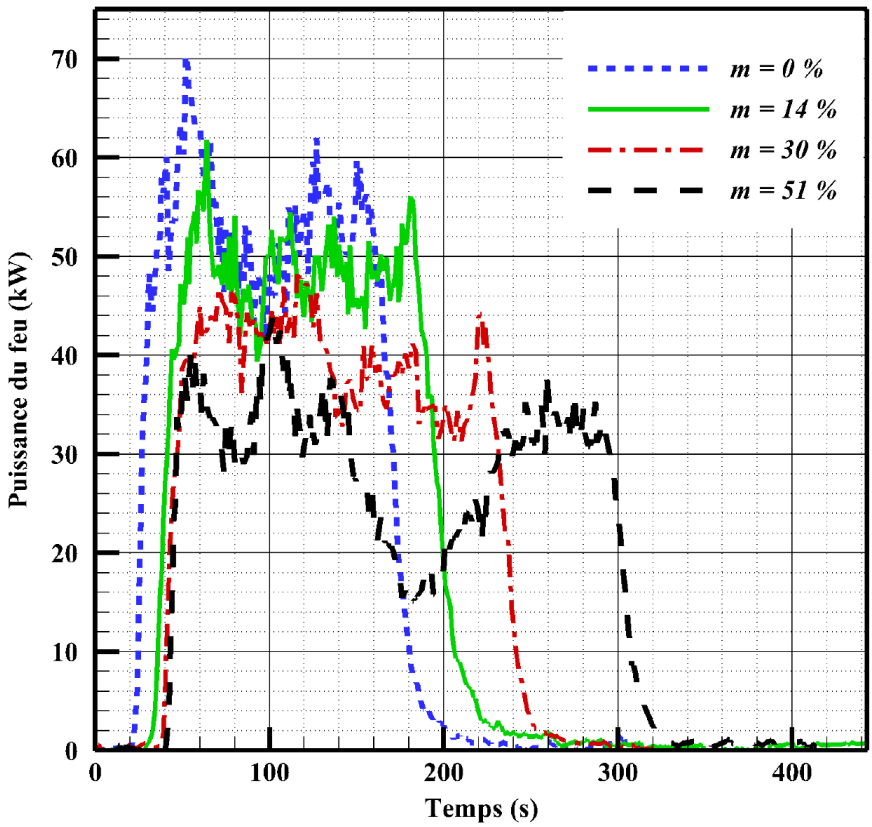


Figure 5.2 *Puissance des feux évaluées pour un échantillon des tests de brûlage réalisés à l'université de Corse avec la frisure de bois d'épaisseur 8 cm pour 4 valeurs de teneurs en eau : 0 ; 14 ; 30 et 51 %.*

La figure 5.2 montre une diminution de la puissance du feu de 50 kW à 35 kW, soit 30 % suite à une augmentation de la teneur d'eau de 0 à 51 %. De plus, cette figure permet de constater que la fréquence d'oscillation de la puissance diminue avec la teneur en eau. Effectivement, la fréquence d'oscillation de HRR (Heat Release Rate) a diminué de 82 % lorsque *m* a augmenté de 0 à 51 %. Ceci peut être expliqué par l'augmentation du temps d'ignition des particules suite à l'augmentation de la phase de préchauffage et par conséquent un rétablissement retardé du front de la flamme. Finalement, la courbe de *m* = 51 % montre un

comportement marginal suite à une chute de puissance de 25 kW à un temps t = 180 s, la puissance remonte de nouveau et le feu continue à se propager.

Ce comportement marginal est aussi identifié dans la figure 5.3 représentant le rapport de la masse instantanée (kg) du combustible sur sa masse initiale mesurée à t = 0 s, pour quatre valeurs de teneurs en eau : 0 ; 14 ; 30 et 51 %. La courbe correspondante à une *m* = 51 % montre un changement de pente après un temps t = 180 s. Ainsi, la pente des courbes représentant la vitesse de de dégradation du combustible (ψ) sont évaluées pour les différentes teneurs en eau :

- pour *m* = 0 %, $\dot{\psi} = -0{,}00301$;
- pour *m* = 14 %, $\dot{\psi} = -0{,}00277$;
- pour *m* = 30 %, $\dot{\psi} = -0{,}00247$;
- pour *m* =51 %, t = 70 s – t = 180 s $\dot{\psi} = -0{,}00231$;

  t =180 s – t = 300 s $\dot{\psi} = -0{,}00200$;

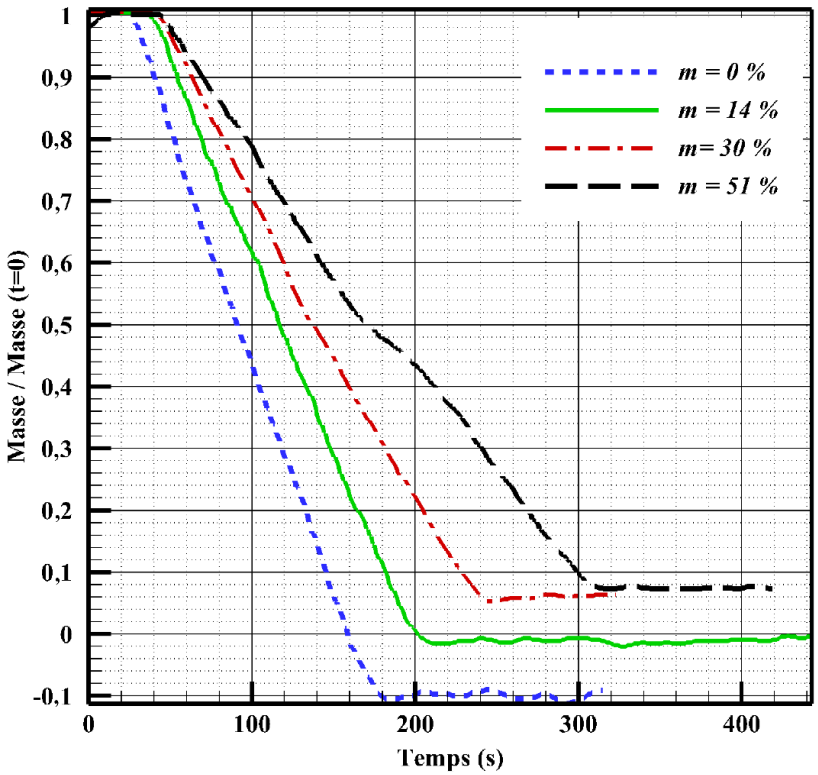


Figure 5.3 *ψ/ψ(t=0) évalué pour un échantillon des tests de brûlages réalisés à l'Université de Corse avec la frisure de bois d'épaisseur 8 cm pour quatre valeurs de teneurs en eau : 0 ; 14 ; 30 et 51 %.*

Ces résultats illustrent également un autre effet de l'augmentation de la teneur en eau sur le comportement de feu qui est la diminution de la vitesse de dégradation du combustible. Évidemment, l'augmentation du temps du réchauffement des particules solides due à la perte d'une quantité d'énergie fournie par la combustion pour évaporer l'eau du combustible provoque la diminution de la vitesse de dégradation en augmentant le temps nécessaire pour que les particules solides atteignent la température de déclenchement de dégradation (400 °C).

En outre, la figure 5.3 montre aussi, comme prévu, une augmentation de la masse restante de 0,08 kg lorsque la teneur en eau a augmenté de 0 % à 51 %.

L'énergie totale reçue par le combustible, mesurée à l'aide du fluxmètre monté parallèlement au lit du combustible, est représentée sur la figure 5.4.

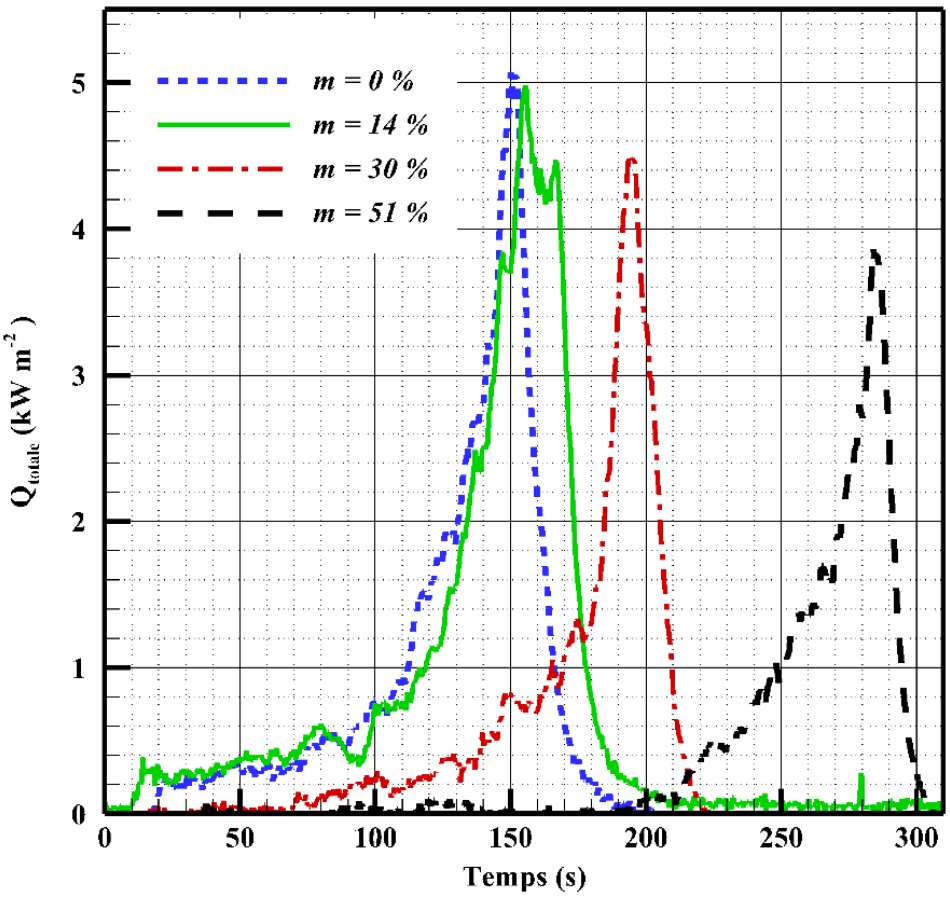


Figure 5.4 *Flux total évalué pour un échantillon des tests de brulage réalisé à l'Université de Corse avec de la frisure de bois d'épaisseur 8 cm pour quatre valeurs de teneurs en eau : 0 ; 14 ; 30 et 51 %.*

La figure 5.4 montre une diminution du flux total d'environ 1200 W m^{-2} suite à une augmentation de la teneur en eau de 0 à 51 %. Ce phénomène peut être considéré comme une conséquence directe de la diminution de la température des produits de la pyrolyse après leur dilution par la vapeur d'eau produite et ainsi la diminution des transferts de chaleur radiatif et convectif (nommé effet tampon).

V.1.2.2 Évaluation de la teneur en eau d'extinction

L'extinction du feu est un phénomène dû à une carence d'énergie reçue par la végétation non brûlée située en aval de la flamme [19]. Le Pr. Dominique Morvan a proposé deux raisons pouvant mener à cette extinction : soit par une quantité insuffisante de combustible ou un manque d'oxygène dans la zone de combustion [18]. Une teneur en eau importante peut ainsi être la cause et provoquer les deux raisons de l'extinction citées par Morvan. En effet, *m* joue un rôle majeur dans l'équilibre énergétique. Étant donné qu'une quantité d'énergie produite par la combustion est perdue pour déshydrater le combustible, cela diminue l'énergie utilisable pour la poursuite des phases de pyrolyse et de combustion. Ainsi, une augmentation de la teneur en eau provoque donc une diminution de la concentration des produits de pyrolyse due à la dilution de l'oxygène présent dans la zone de combustion [177]. Ceci a pour conséquences la diminution de la température de la flamme, des échanges thermiques, de la température du combustible non brûlé et ainsi de la quantité de combustible non brûlé dans la zone de combustion [168]. La littérature montre qu'un feu est dans l'incapacité de se propager pour une fraction massique d'oxygène inférieure à 0,15 [18,246].

Le lit de frisure de bois de 8 cm d'épaisseur est modélisé à l'aide de FireStar2D. Les simulations numériques montrent que le feu perd sa capacité à se propager pour une teneur en eau proche de 50 %. La figure 5.5 montre qu'alors, la température des gaz juste après l'ignition est inférieure à 600 K donc inférieure à la température maximale de pyrolyse (673 K). Ce

résultat peut s'expliquer par la perte d'une quantité d'énergie produite par le feu pour évaporer l'eau du combustible. La vapeur d'eau produite a pour conséquence une dilution de l'oxygène situé dans la zone de combustion [177]. La réaction de combustion devient alors incomplète et produit du charbon plutôt que des produits volatiles à température élevée [247]. L'intensité du feu diminue, comme la quantité de combustible utilisable pour la combustion, ce qui peut entraîner l'extinction du feu.

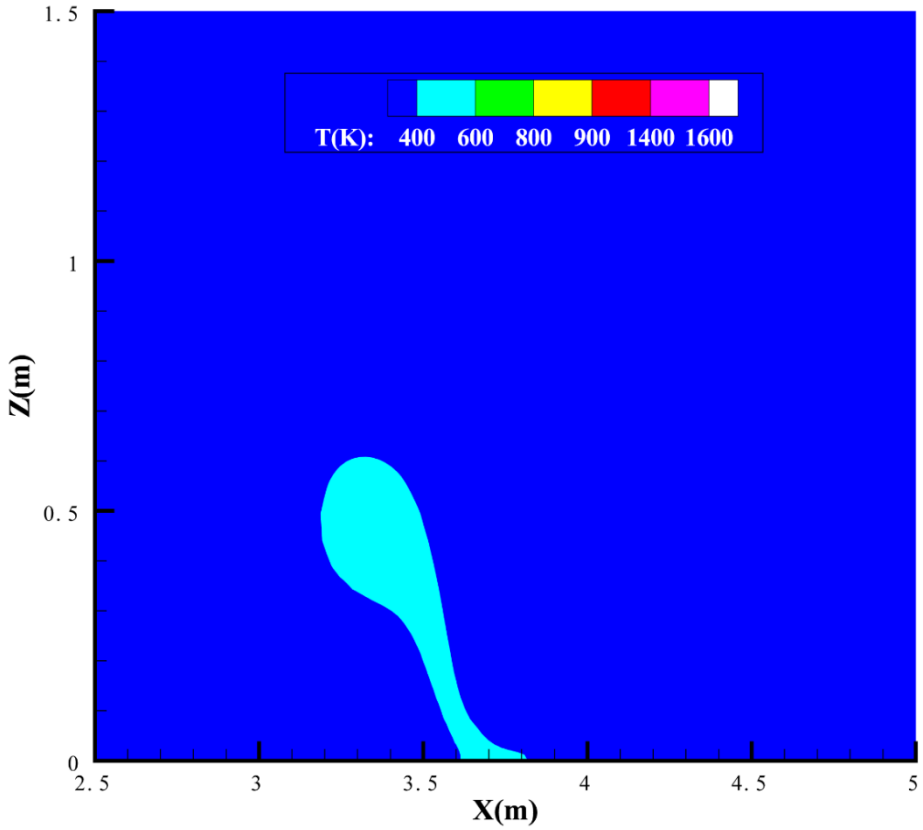


Figure 5.5 *Profil de température évalué avec FireStar2D avec un lit en frisure de bois d'épaisseur 8 cm.*

La teneur en eau d'extinction est évaluée pour la frisure de bois au moyen de tests en laboratoire réalisés à l'Université de Corse. Les résultats expérimentaux sont comparés à ceux fournis par FireStar2D, par le modèle semi-physique et par la formule empirique de Wilson. Les différents résultats sont présentés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 *Seuils d'extinction obtenus avec la frisure de bois pour trois charges surfaciques (0,15 kg m^{-2} ; 0,20 kg m^{-2} et 0,40 kg m^{-2}) à l'aide de tests expérimentaux, de FireStar2D, du modèle semi-physique et de la loi de Wilson*

Charge surfacique (kg m^{-2})	**m_x (Expérimental) (%)**	**m_x (FireStar2D) (%)**	**m_x (Modèle semi-physique) (%)**	**m_x (Loi de Wilson) (%)**
0,15	46 à 55	37	52,9	50
0,20	58 à 65	50	54,5	57,8
0,40	65 à 70	55	54,5	75

Il faut noter que pour des propagations à l'échelle du laboratoire et avec l'ajout des deux parois latérales, le front de la flamme obtenu est quasi-vertical (figure 3.5). C'est la raison pour laquelle l'effet du vent induit a été négligé dans cette configuration pour le modèle semi-physique. Les résultats du tableau 5.1 montrent une très bonne concordance ainsi qu'une faible déviation entre le modèle semi-physique et les résultats expérimentaux. Les résultats fournis par FireStar2D et la loi empirique de Wilson sont en adéquation avec les résultats expérimentaux. Le modèle empirique de Wilson fournit des résultats proches de m_x pour des valeurs de charges surfaciques faibles mais surestime notablement les résultats pour des charges surfaciques plus grandes. Cela peut s'expliquer par le fait que la loi empirique de Wilson a été déterminée en se basant sur des données expérimentales bien spécifiques. Ainsi, durant ses expériences, Wilson a brûlé de la frisure de bois ayant les propriétés suivantes : la fraction volumique a varié entre $6{,}3\times10^{-4}$ et 8×10^{-2}, le rapport surface-volume est de 8130 m^{-1}, et finalement l'épaisseur du lit de combustible a varié entre 5×10^{-2} et 11×10^{-2} m. Ainsi, l'épaisseur de la dernière série d'expériences réalisées au laboratoire de l'université de Corse est de 16×10^{-2} m, hors de l'intervalle étudié par Wilson.

V.1.3 Confrontation des données expérimentales tirées de la littérature avec l'approche semi-physique, FireStar2D et la loi de Wilson

Dans cette partie, la formule analytique donnant la teneur en eau d'extinction tiré de la modélisation semi-physique du comportement des feux de surface est confrontée à la loi empirique de Wilson [19] et à des tests expérimentaux menés à l'échelle du laboratoire par Weise *et al*. [142,181] pour des combustibles de type litières mais également de type maquis.

V.1.3.1 Comparaison entre l'approche semi-physique et la loi empirique de Wilson

Deux types de végétations sont choisis : la frisure de bois et les aiguilles de pin. Le tableau 2.3 du chapitre II résume les propriétés physiques des combustibles employés. Les résultats obtenus avec le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson sont présentés dans la figure 5.6.

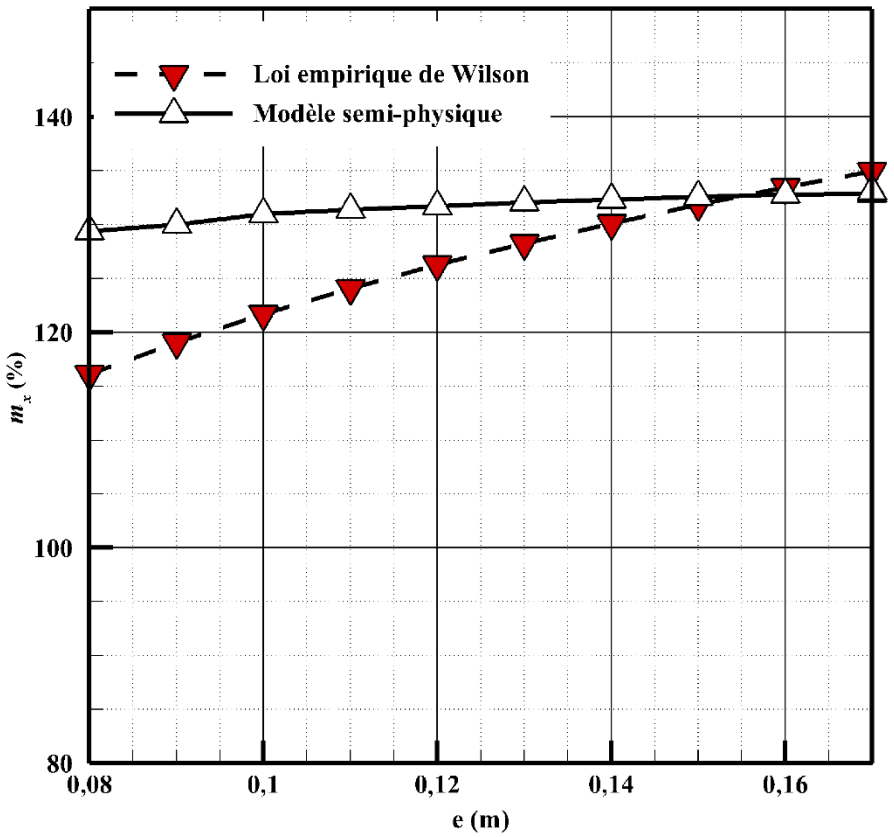


Figure 5.6 *Teneur en eau d'extinction en fonction de l'épaisseur du lit de combustible évaluée avec le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson pour la frisure de bois utilisée lors des tests de 1985 par Wilson* [19].

La figure 5.6 montre une faible déviation des résultats des deux modèles. Afin de quantifier l'écart entre les deux approches pour la configuration de la frisure de bois tirée des travaux de Wilson [19] (tableau 2.3), les fonctions statistiques *NMSE*[6], *FB*[7],*et* R^2[8] sont utilisées. Cette analyse statistique montre que les deux approches fournissent des résultats similaires pour un combustible de type frisure : *NMSE* = 0,0029, *FB* = 0,03 et R^2 = 0,983.

La même étude est réalisée avec les aiguilles de pin. La figure 5.7 représente la teneur en eau d'extinction évaluée avec le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson.

[6] Normalized mean square error
[7] Fractional Bias
[8] Coefficient of determination

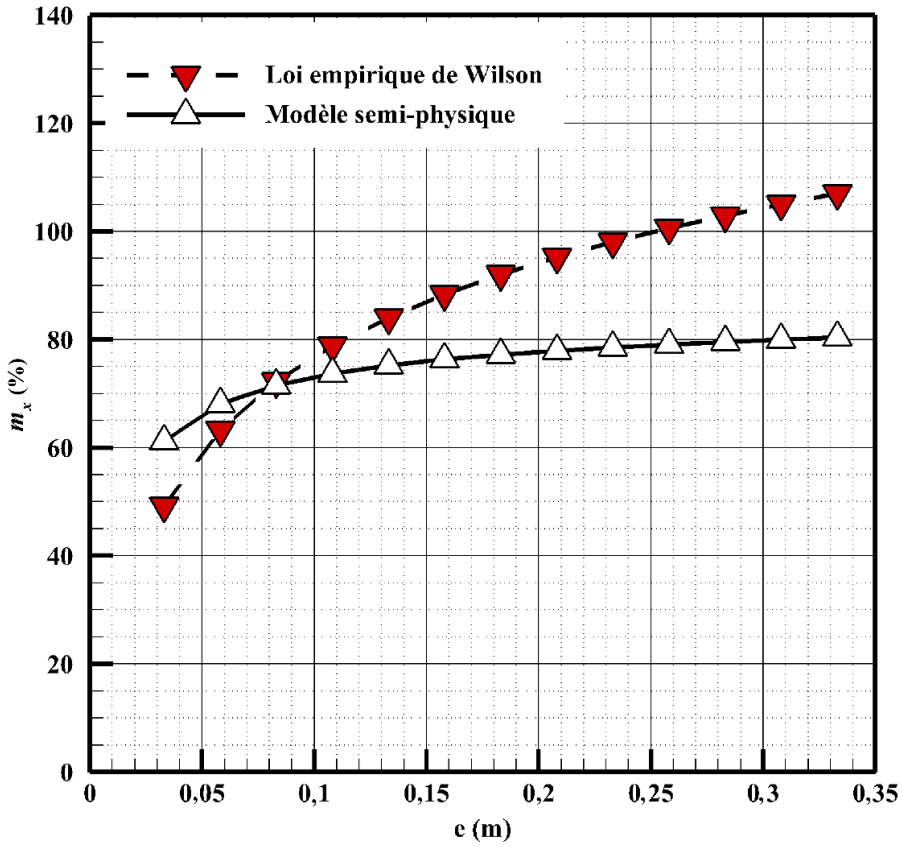


Figure 5.7 *Teneur en eau d'extinction en fonction de l'épaisseur du combustible, évaluée avec le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson pour la configuration des aiguilles de pin tirée des travaux de Wilson 1985.*

La figure 5.7 montre que le modèle semi-physique tend à sous-estimer le seuil d'extinction pour les aiguilles de pin par rapport à la loi empirique de Wilson. Dans des travaux antérieurs, Dickinson *et al*. [183] ont montré que le modèle de Wilson surestime les probabilités de propagation pour les combustibles de type lit forestier et donc les aiguilles de pin. Comme le montre la figure 5.7, la formule de Wilson prévoit un seuil d'extinction supérieure à 100 % pour les aiguilles de pin. Cependant, une autre étude [248] effectuée avec ce type de combustible a montré que la teneur en eau d'extinction pour des aiguilles de pin était plutôt aux environs de 54 % pour des vents relativement faibles ce qui laisse penser que la formule de Wilson surestime bien la teneur en eau d'extinction pour ce combustible. L'écart entre les deux approches, pour la configuration des aiguilles de pin tirée des travaux de Wilson [19]

(tableau 2.3), est donné par l'intermédiaire des fonctions statistiques *NMSE, FB,* et R^2 : *NMSE* = 0,0037, *FB* = 0,129 et R^2 = 0,985.

V.1.3.2 Comparaison entre le modèle semi-physique, la loi de Wilson et les données expérimentales de Weise et al .,1985

Afin d'évaluer la précision du modèle semi-physique pour des propagations sur un combustible de type maquis, une comparaison est réalisée avec les données expérimentales de Weise *et al*. [142,181,182]. Les tests sont menés en utilisant quatre espèces de chaparral *(Adenostoma fasciculatum* (chamise), *Ceanothus crassifolius* (ceanothus), *Arctostaphylos glandulosa* (manzanita), *et Quercus berberidifolia* (Chêne)). 71 tests menés avec une vitesse de vent nulle sont pris en considération. Ces expériences sont menées pour une large gamme de valeurs des caractéristiques du combustible. Ainsi, la fraction volumique varie entre $2,5\times10^{-3}$ et $4,39\times10^{-3}$, le rapport surface-volume varie entre 7,2 et 103 m^{-1} et la teneur en eau des combustibles varie entre 9 % et 106 %. Deux épaisseurs de lit de combustible sont utilisées, 20 et 40 cm. Parmi les 71 tests, le feu a réussi à se propager pour vingt-huit d'entre eux seulement soit 39,4 %.

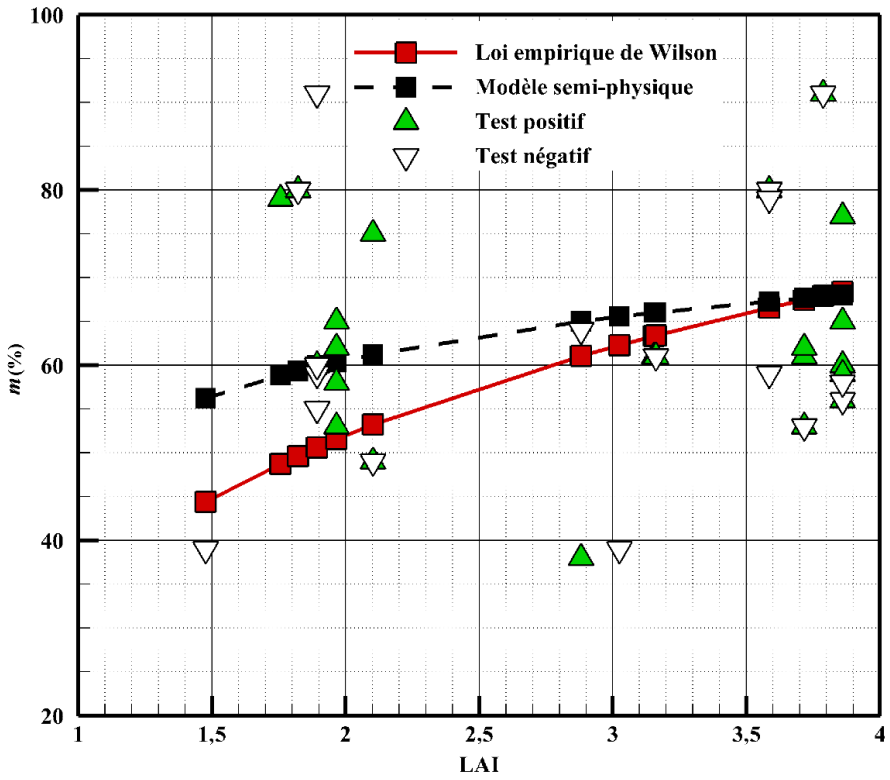


Figure 5.8 *Les valeurs maximales de la teneur en eau de la végétation en fonction de Leaf Index Area (LAI). Test positif : propagation. Test négatif : pas de propagation.*

La figure 5.8 représente le seuil d'extinction de la teneur en eau en fonction du LAI fourni théoriquement par le modèle semi-physique et par la loi empirique de Wilson, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus par Weise *et al*. [181]. Un test est jugé positif si la propagation se produit et négatif si le feu s'éteint. L'approche semi-physique prédit correctement le comportement de 69 % des tests et la loi empirique de Wilson en prédit 71 %. Comme conclusion, il est possible d'avancer que pour cette famille de combustible, le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson fournissent des résultats très proches pour le seuil d'extinction de la teneur en eau de la végétation.

V.2 Étude à l'échelle du terrain

Dans ce paragraphe, le critère de non-propagation lié à la teneur en eau et tiré du modèle semi-physique proposé par Balbi *et al*. en 2014 [141] est testé numériquement, à l'échelle du

terrain, à l'aide du modèle physique complet FireStar2D pour une végétation homogène (l'herbe) et également une végétation hétérogène (maquis).

V.2.1 Cas de l'herbe

V.2.1.1 Présentation des différentes configurations étudiés

Soixante simulations numériques réalisées avec FireStar2D ont été faites sur de l'herbe dite « australienne » en se basant sur la configuration tirée de l'article de Morvan en 2013 [18]. Les propriétés physiques de l'herbe homogène utilisée sont présentées par le tableau 5.2.

Le but principal de ces simulations est de déterminer un seuil d'extinction lié à la teneur en eau de la végétation et de comparer les résultats avec ceux fournis par l'approche semi-physique. Dans un second temps, une étude de l'influence de certaines propriétés du combustible sur ce seuil d'extinction permettra d'identifier ceux jouant un rôle majeur.

Tableau 5.2 *Propriétés physiques de l'herbe « australienne ».*

Propriété physique	**Valeur**
Masse Volumique (kg m^{-3})	500
Fraction volumique ($\beta \times 10^{-3}$)	2
Enthalpie de pyrolyse du mélange gazeux (kJ kg^{-1})	1 400
Charge surfacique (kg m^{-2})	0,7
Rapport surface volume (m^{-1})	4 000
Leaf area index (LAI)	2,8

Cinq épaisseurs du lit de combustible sont choisies : 0,4 ; 0,7 ; 0,9 ; 1,5 et 2 m. La fraction volumique est conservée constante durant les différentes simulations. Afin d'assurer la

propagation du front de flammes et la convergence des résultats, une vitesse de vent très faible est imposée à l'entrée du domaine d'intensité 0,1 m s^{-1} à 10 m d'altitude.

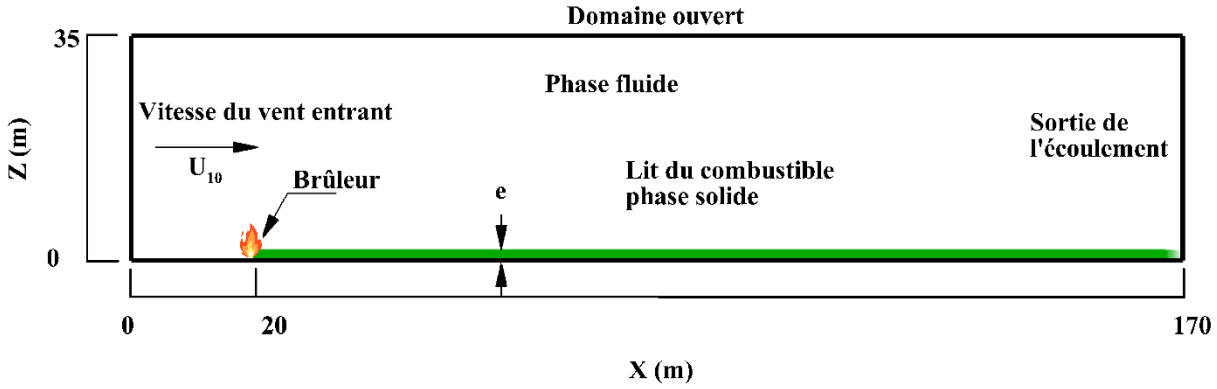


Figure 5.9 *Représentation du domaine et des conditions limites correspondants aux simulations numériques 2D réalisées avec l'herbe « australienne ».*

Comme le montre la figure 5.9, toutes les simulations sont menées dans un domaine 2D de longueur 170 m et de hauteur 35 m. La végétation est distribuée d'une manière homogène entre X = 20 m jusqu'à X = 170 m. Le couvert végétal a été supprimé dans les premiers 20 m du domaine afin de contrôler la direction de propagation des feux [18]. Le profil de la vitesse du vent est décrit par une fonction logarithmique (5.4), imposée à l'entrée gauche du domaine de compilation [249].

$$U_X(Z) = A \times ln\left(\frac{Z+z_0}{z_0}\right) \quad (5.4)$$

Avec *A* une constante adaptée pour fixer une valeur U_{10} bien précise, en supposant un terrain nu à l'entrée du domaine. z_0 est un coefficient appelé longueur de rugosité [250] considérée égale à 0,01. Pour un profil de vitesse logarithmique, ce paramètre est équivalent à la hauteur à laquelle la vitesse théorique du vent deviendrait nulle. La mise à feu est réalisée avec un brûleur injectant du CO à 1600 K à une vitesse de 1 m s^{-1}, à travers la terre. La longueur du brûleur est de 2 m. Le CO est injecté pendant 5 s et après 30 s de simulation afin d'aboutir à une stabilité des couches de turbulence à l'intérieur et au-dessus du lit de végétation [18].

Pour obtenir des résultats robustes et convergents, les dimensions des mailles doivent respecter des critères physiques liés à la structure de la végétation [18,213] :

$$\Delta X < \delta = \frac{4}{s\beta} \quad (5.5)$$

$$\Delta Z < min(\frac{e}{4}, \delta) \quad (5.6)$$

En effet, le critère sur l'axe des abscisses peut être justifié par l'importance de la contribution des transferts radiatifs dans la propagation des feux [213]. D'où la nécessité de relier la dimension du maillage à une grandeur qui les décrit, ici la longueur d'extinction. Le critère sur l'axe des ordonnées est lié lui à une représentation optimale des diverses structures de turbulence dues à l'effet de cisaillement induit par les couches de la végétation [211].

V.2.1.2 Comparaison entre l'approche semi-physique, Firestar2D et la loi empirique de Wilson

Six simulations numériques sont menées avec Firestar2D en utilisant l'herbe homogène « australienne » de hauteur 70 cm afin d'évaluer l'influence de la teneur en eau du combustible sur la vitesse de propagation des feux. Les différentes propriétés du combustible sont considérées constantes exceptée la teneur en eau. La figure 5.10 représente le rapport de ROS/ROS(0) en fonction de la teneur en eau pour un vent et une pente nuls.

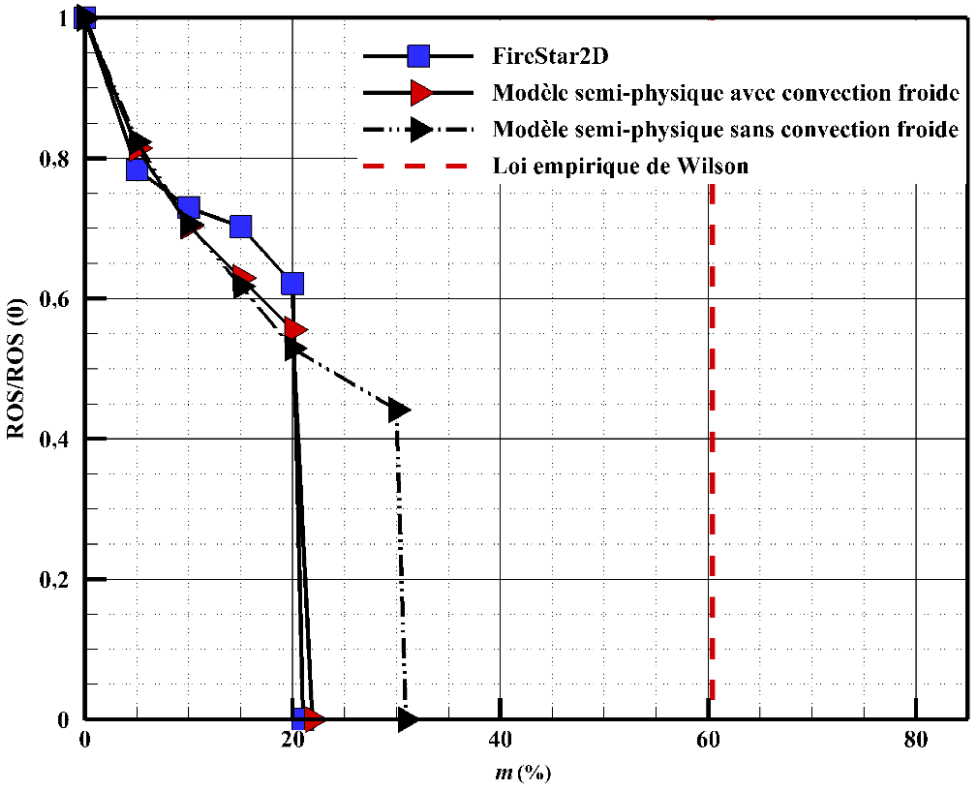


Figure 5.10 *Évolution de ROS/ROS(0) à plat et à condition d'un vent nul en fonction de la teneur en eau pour un lit de l'herbe australien de 70 cm d'épaisseur.*

Comme attendu, les différentes courbes montrent que le rapport ROS/ROS(0) est une fonction décroissante de la teneur en eau du combustible. De plus, même à cette échelle les résultats du modèle semi-physique sont très proches de ceux obtenus avec le code complet FireStar2D.

V.2.1.3 Évaluation de la teneur en eau d'extinction du combustible

De nombreuses études expérimentales évaluent une teneur en eau d'extinction comprise entre 20 et 25 % dans le cas de l'herbe [18,160]. Dans le cas où l'effet de refroidissement n'est pas pris en compte (flamme verticale), le modèle semi-physique fournit un seuil d'extinction de 35,5 %. Mais si l'effet de refroidissement est pris en compte (flamme penchée dans la direction du combustible brûlé), le modèle semi-physique propose un seuil d'extinction de 24 %, ce qui en accord avec le résultat donné par FireStar2D dans cette configuration (21 %).

Ce résultat est confirmé par la figure 5.11 qui représente le champ de température des gaz évalué avec de l'herbe d'épaisseur 70 cm. Elle confirme l'importance de l'effet de refroidissement qui se produit en aval de la flamme et qui la penche en arrière à l'opposé du sens de propagation du front de flammes.

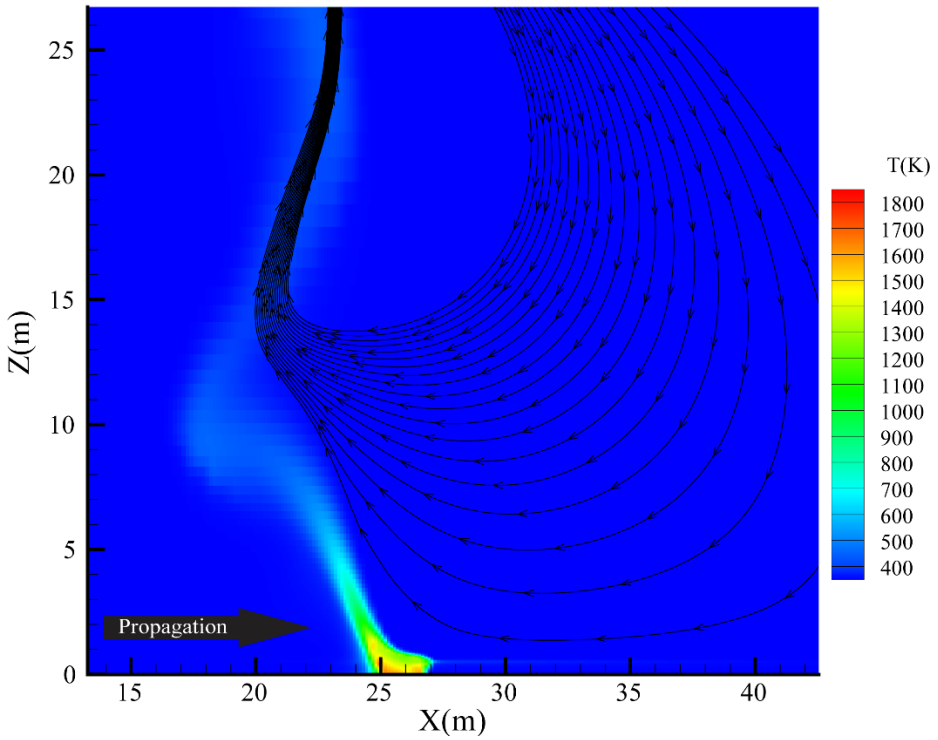


Figure 5. 11 *Champs de température et les vecteurs de vitesses évalués pour l'herbe d'épaisseur 70 cm sous condition d'un vent très faible : U_{10} = 0,1 m s^{-1}.*

Par contre, la loi empirique proposée par Wilson fournit un résultat notablement différent des deux autres modèles. En effet, elle surestime fortement ce seuil d'extinction (60,4 %). Ceci peut être expliqué par le fait que la loi empirique de Wilson a été conçue en se basant sur des données expérimentales bien précises. Ainsi, durant ces expériences la fraction volumique a varié entre 5×10^{-3} et 0,32, le rapport surface-volume entre $3,2\times10^{2}$ et $8,13\times10^{3}$ cm^{-1}, et finalement l'épaisseur du lit de combustible a varié entre $2,5\times10^{-2}$ et 2×10^{-2} m. Or, dans la configuration étudiée, le lit de combustible a une épaisseur de 70 cm. Cette valeur est en dehors de l'intervalle utilisé par Wilson, c'est pourquoi cette loi n'est pas applicable dans

ce cas précis. Une modification est réalisée sur le modèle de Wilson pour qu'il soit applicable à l'herbe « australienne ». Le logarithme népérien est remplacé par un logarithme de base 10 :

$$m_x = 0{,}25 \times Log_{10}(4 \times LAI) \quad (5.7)$$

La loi modifiée de Wilson fournit un seuil de 26 %, très proche des résultats des modèles semi-physique et complet.

V.2.2 Cas de végétations hétérogènes

V.2.2.1 Présentation des différentes configurations étudiées

Le modèle semi-physique n'est pas conçu pour des végétations hétérogènes. Il ne peut donc être implémenté directement pour ces végétations qui sont formées par plusieurs types de composants ayant des propriétés physiques différentes, par exemple les feuilles et les tiges. Ainsi, afin de déterminer le seuil d'extinction lié à la teneur en eau avec l'approche semi-physique, un modèle de végétation homogène équivalent doit être proposé. Ce modèle est ici déterminé à partir des proportions de chaque type de composants présents dans le végétal hétérogène. Deux types de végétations hétérogènes, fréquentes en Corse, sont étudiés : *Genista salzamannii* et *Arbutus unedo*. Les tableaux 5.3 et 5.4 représentent les différentes propriétés physiques des modèles de végétation équivalents utilisés.

Tableau 5.3 *Propriétés physiques du modèle de végétation équivalent du Genista salzamannii* [107].

Propriétés physiques	Valeur
Masse volumique (kg m^{-3})	478
Fraction volumique ($\times 10^{-3}$)	1,7
Épaisseur (m)	0,48
Enthalpie de combustion des gaz de pyrolyse (kJ kg^{-1})	1648
Charge surfacique (kg m^{-2})	0,4
Rapport surface volume (m^{-1})	3100
Leaf Area Index (LAI)	1,25

Tableau 5.4 *Propriétés physiques du modèle de végétation équivalent du Arbutus unedo* [251].

Propriétés physiques	Valeur
Masse volumique (kg m^{-3})	720
Fraction volumique ($\times 10^{-3}$)	2
Épaisseur (m)	0,36
Enthalpie de combustion des gaz de pyrolyse (kJ kg^{-1})	1470
Charge surfacique (kg m^{-2})	0,5
Rapport surface volume (m^{-1})	5544
Leaf Area Index (LAI)	2

Les simulations numériques sont réalisées avec FireStar2D dans un domaine de 150 m de longueur et de 35 m de hauteur. Une vitesse de vent très faible est ajoutée à l'entrée du domaine de calcul d'intensité 0,1 m s^{-1} à 10 m d'altitude. Les dimensions du maillage respectent les critères physiques (5.5) et (5.6) mentionnés dans le § V.2.1.1.

V.2.2.2 Comparaisons entre l'approche semi-physique, FireStar2D et la loi empirique de Wilson

Les teneurs en eau d'extinction évaluées pour le *Genista salzamannii* et l'*Arbutus unedo* à l'aide de FireStar2D, le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson sont présentées dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5 *Les teneurs en eau d'extinction évaluées à l'aide du modèle semi-physique, FireStar2D et la loi empirique de Wilson pour le Genesta Salzamannii et l'Arbutus Unedo.*

Végétation	m_x (%) (Modèle semi-physique)	m_x (%) (FireStar2D)	m_x (%) (Loi empirique de Wilson)
Genista salzamannii	29,5	23	40,5
Arbutus unedo	17,5	21	51,9

Les résultats fournis par FireStar2D et le modèle semi-physique montrent une faible différence entre les deux approches. La loi empirique de Wilson, elle, surestime d'un facteur voisin de 2, les seuils d'extinction correspondant à ces deux végétaux obtenus avec les deux autres méthodes. Deux études antérieures de la littérature [181,182], basées sur des tests expérimentaux et utilisant des tiges et des feuilles de quatre types de chaparral, confirment ce résultat. En effet, elles montrent que la loi de de Wilson surestime le seuil d'extinction de la teneur en eau de la végétation dans cette configuration [181]. Les auteurs ont aussi proposé une modification de la loi de Wilson :

$$m_x = 0{,}2 \times ln(4 \times LAI) \tag{5.8}$$

Après modification, la loi estime les seuils d'extinction à 32 % et 41 % pour la *Genista salzamannii* et l'*Arbutus unedo* respectivement. D'autres travaux de la littérature [180]

avancent un seuil d'extinction de 32 % pour les maquis méditerranéens, ce qui est plus conforme aux résultats estimés par le modèle semi-physique et FireStar2D que les valeurs élevées de la loi de Wilson.

V.3 Influence de certaines propriétés du combustible sur la teneur en eau d'extinction

Le comportement d'un feu de forêt ne dépend pas que des facteurs météorologiques et topographiques, mais aussi directement de la végétation et de ses propriétés physico-chimiques. Ainsi, les rôles joués par la teneur en eau [19,181,252], la charge surfacique [142,143,183], et la fraction volumique [143,183] sont primordiaux dans la détermination des critères d'extinction d'un feu. Souvent les critères d'extinction liés à la teneur en eau du combustible, dépendent directement de sa structure [19,141]. Ainsi, le but de ce paragraphe est d'étudier l'influence de la charge surfacique de la végétation et de sa structure (LAI) sur le seuil de teneur en eau du combustible provoquant l'extinction du feu.

V.3.1 Effet de la charge surfacique sur la teneur en eau d'extinction

La charge surfacique est considérée comme un paramètre important de la propagation d'un feu de surface [143,181]. Par exemple, Morvan et Dupuy [47] ont montré que la vitesse de propagation est notablement dépendante de cette charge surfacique. Ils en ont déduit que la variation du ROS en fonction de σ pouvait être scindée en trois zones. Pour les deux premières zones, correspondant respectivement aux charges surfaciques faibles et moyennes, le ROS croît linéairement avec cette charge. Pour la troisième zone, correspondant à des charges surfaciques élevées, la vitesse de propagation du feu tend vers une asymptote horizontale et devient donc indépendant de la charge surfacique.

La charge surfacique est également corrélée à l'épaisseur de la végétation par la formule suivante :

$$\sigma = \beta \rho_v e \tag{5.9}$$

Ainsi, pour une même végétation (ρ_v = constante et β = constante), la charge surfacique ne dépend que de l'épaisseur du combustible.

La loi empirique proposée par Wilson indique une croissance du seuil d'extinction du feu en fonction de l'épaisseur du lit de combustible et donc de sa charge surfacique. Le critère d'extinction proposé par Balbi *et al*. est une formule analytique prenant aussi en compte la charge surfacique. Pour des épaisseurs de combustible élevées, la formule analytique montre que ce seuil d'extinction tend bien vers une constante :

$$\lim_{e\to\infty}(m_x) = \frac{\tau_0 B T^4 - n\rho_v c_p (T_i - T_a)}{\Delta h n \rho_v \Delta h} = \text{constante} \tag{5. 10}$$

Dans le cas de l'herbe, et en utilisant les données du tableau 5.4, la valeur suivante est obtenue en appliquant la relation (5.10) : $\lim_{e\to\infty}(m_x) = 33{,}5\ \%$.

Afin de montrer que la valeur de la charge surfacique de la végétation impacte également la valeur du seuil d'extinction de la teneur en eau du combustible, des simulations numériques sont réalisées avec le code complet 2D sur le même combustible et en utilisant la configuration décrite dans le paragraphe § V.2. L'épaisseur de la végétation varie entre 0,3 et 2 m tout en conservant une fraction volumique constante. Les résultats des différentes simulations sont comparés à ceux obtenus avec le modèle semi-physique dans le Tableau 5.6.

Tableau 5.6 *Teneurs en eau d'extinction en fonction de la charge surfacique évaluées à l'aide de FireStar2D et du modèle semi-physique pour la configuration de l'herbe « australienne » à plat et sans vent.*

Charge surfacique σ (kg m^{-2})	**m_x (%) (FireStar2D)**	**m_x (%) (Modèle semi-physique)**
0,3	19	17,8
0,7	21	24,0
0,9	32	25,4
1,5	33	27,6
2	33	28,7
Infinity	-	33,5

Les résultats du tableau 5.6 montrent bien une dépendance entre la charge surfacique et le seuil d'extinction de la teneur en eau de la végétation. De plus, FireStar2D confirme la tendance obtenue par le modèle semi-physique : le seuil d'extinction augmente avec la charge surfacique jusqu'à une valeur limite où il devient indépendant de cette charge.

L'influence de l'épaisseur du lit de combustible sur la réussite ou non de la propagation d'un feu a déjà été étudiée antérieurement par Zhou *et al*. [253]. Pour cela, deux cas sont considérés. Le premier cas (A), étudie la propagation d'un feu sur un lit de combustible caractérisé par un rapport surface volume de 2300 m^{-1}, une fraction volumique de 0,01, une teneur en eau m_A = 38,1 % et une masse volumique de 560 kg m^{-3}. Le deuxième cas (B), effectue la même étude avec la même végétation mais avec une charge surfacique doublée par rapport au premier cas. Les auteurs ont indiqué que le feu ne se propageait que pour la seconde configuration. Ils ont ainsi avancé l'hypothèse, que pour une fraction volumique constante, la

probabilité de propagation du feu croît avec l'augmentation de la charge surfacique ou celle de l'épaisseur du lit de combustible.

Dans le but de tester numériquement cette hypothèse, les deux configurations (A et B) sont utilisées par l'approche semi-physique afin de déterminer la valeur de la teneur en eau théorique au-dessus de laquelle le feu ne devrait pas être en capacité de se propager. Dans le cas A, c'est à dire pour une végétation ayant une teneur en eau de 38,5 %, le modèle semi - physique prédit un seuil d'extinction de 32 %. Ce seuil étant inférieur à la teneur en eau de la végétation, le feu ne doit pas se propager. Pour le cas B, le modèle physique prédit un seuil à 40,6 %. Dans ce cas, le seuil est supérieur à la teneur en eau de la végétation et le feu doit donc être en capacité de se propager. Ces deux tests numériques montrent bien que le modèle semi-physique prédit correctement ce qui avait été observé expérimentalement par Zhou *et al*.

L'influence de la charge surfacique sur le seuil en teneur en eau d'extinction du feu est étudiée grâce aux travaux expérimentaux menées au laboratoire à Corte. Les tests expérimentaux sont réalisés avec trois charges surfaciques différentes (0,15 ; 0,2 et 0,4 kg m^{-2}), une fraction volumique constante de 0,002 et une teneur en eau variant de 0 à 75 %. Les résultats expérimentaux sont présentés sur la figure 5.12.

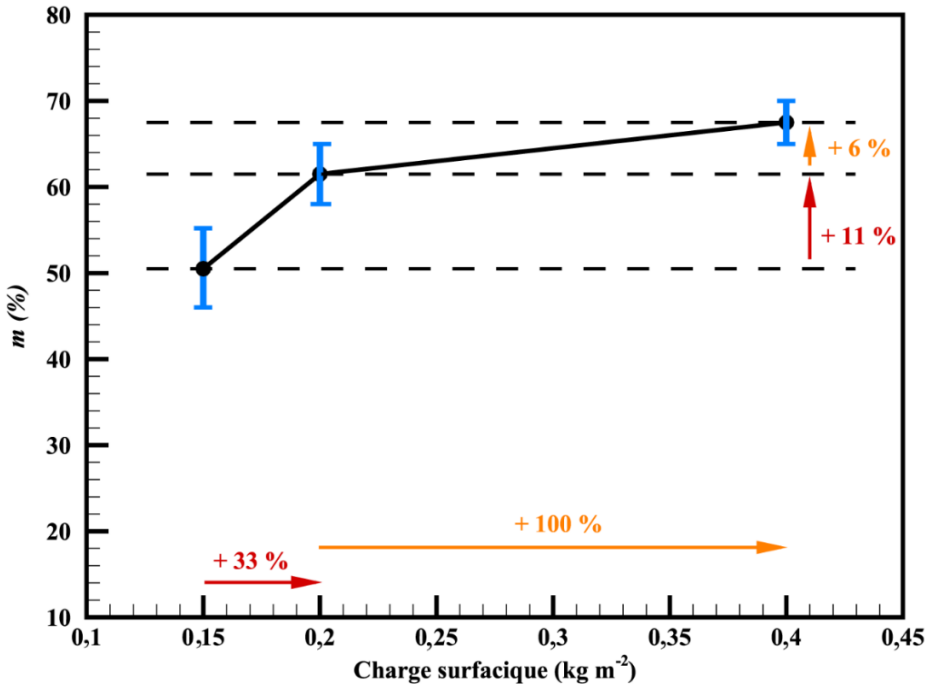


Figure 5.12 *Teneur en eau d'extinction du feu évaluée expérimentalement pour la frisure de bois pour les charges surfaciques suivantes : 0,15 ; 0,2 et 0,4 kg m^{-2}.*

Les résultats présentés dans la figure 5.12 confirment la tendance obtenue par le modèle semi-physique. En effet, la figure 5.13 montre qu'une augmentation de la charge surfacique de 0,15 à 0,2 kg m^{-2} (33 %) aboutit à une augmentation du seuil d'extinction respectivement de 11 %, 20 %, 3 % et 15 % pour les tests expérimentaux, le modèle semi-physique, FireStar2D et la loi empirique de Wilson, respectivement. De même, une augmentation plus importante de 0,2 à 0,4 kg m^{-2} (l00 %) de cette charge, amène à une augmentation beaucoup moins significative du seuil d'extinction. En effet, cette augmentation n'est que de 6 %, 0 % ,10 % et 30 % pour les tests expérimentaux, le modèle semi-physique, FireStar2D et la loi empirique de Wilson, respectivement. Il est à noter une augmentation plus importante (30 %) pour le seuil fourni par la loi proposée par Wilson. Le modèle semi-physique reproduit bien la tendance qui est donnée numériquement par FireStar2D et expérimentalement par les tests à l'échelle du laboratoire.

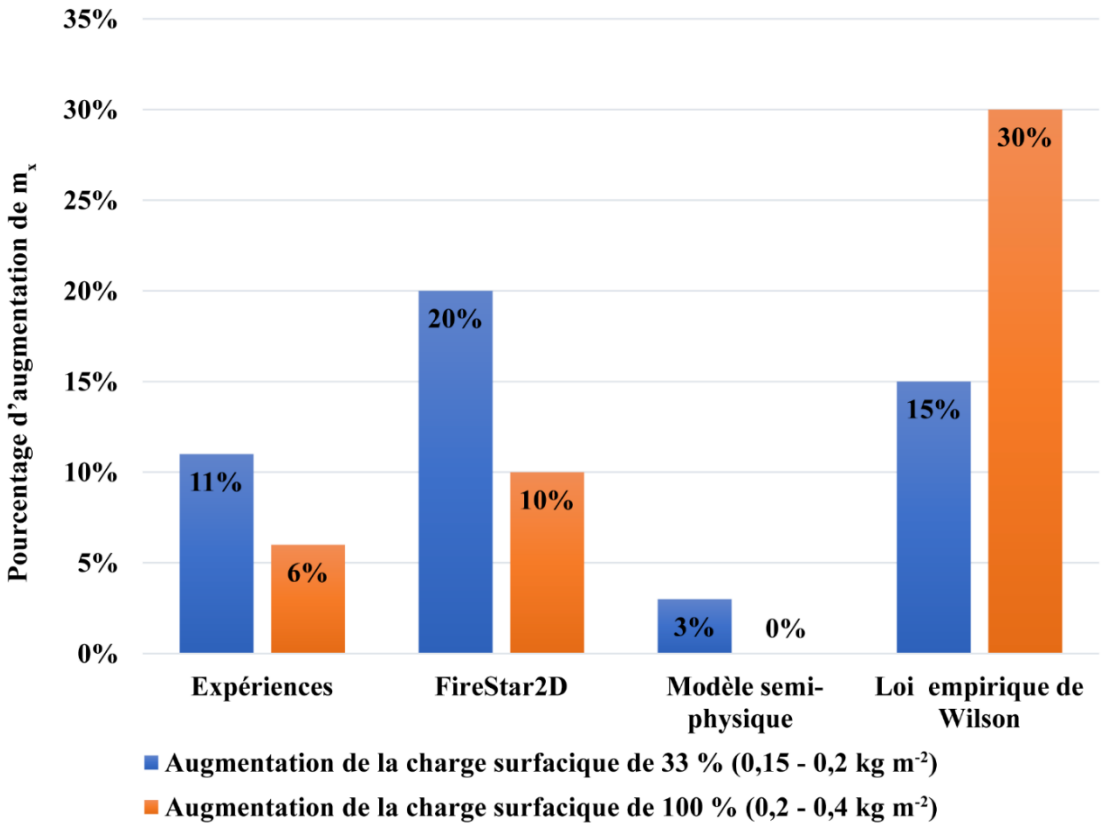


Figure 5.13 *Évolution de m_x pour une fraction volumique constante de 0,0032 et dans le cas de deux augmentations de la charge surfacique (33 % et 100 %).*

La figure 5.14 compare les seuils d'extinction obtenus avec le modèle semi-physique et de la loi empirique de Wilson pour la frisure de bois ayant une charge surfacique qui varie de 0,025 à 0,5 kg m^{-2}. Pour des charges surfaciques faibles (< 0,125 kg m^{-2}), les deux approches prédisent une augmentation de ce seuil suivant sensiblement la même tendance. Pour des charges surfaciques plus importantes, la loi empirique de Wilson continue à prédire une augmentation du seuil tandis que le modèle semi-physique prévoit que ce seuil atteint une valeur constante. Les résultats du modèle de Wilson sont certainement dus au fait que ce modèle empirique est conçu suivant des configurations bien déterminées impliquant que son utilisation doit se faire avec une grande précaution pour d'autres configurations.

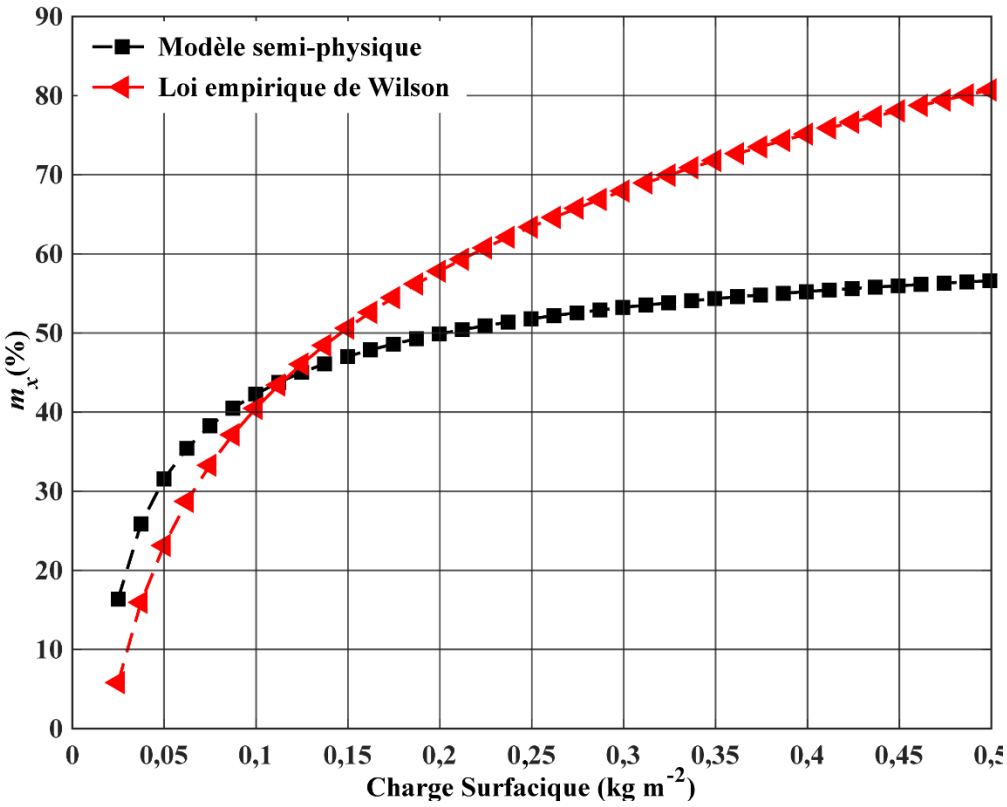


Figure 5.14 *Seuils d'extinction en fonction de la charge surfacique de la frisure de bois ayant une fraction volumique constante de 0,0032.*

V.3.2 Étude d'un cas particulier : LAI constant

La fraction volumique est une indication sur la compacité du lit de combustible. Elle est définie comme étant la fraction du volume réellement occupée par les particules du combustible. Ainsi, la diffusion de l'oxygène à l'intérieur d'un lit de combustible dépend fortement de cette dernière. Une étude expérimentale antérieure [182] avance même que la vitesse de propagation du feu est inversement proportionnelle à cette fraction volumique. D'autres travaux [144,254] indiquent que la vitesse de propagation croît avec l'épaisseur du lit de combustible.

Ce paragraphe étudie donc l'influence de la fraction volumique ainsi que de l'épaisseur du lit de la végétation sur le seuil d'extinction. Le cas d'un combustible avec un LAI constant est considéré. Ce cas particulier est obtenu, en conservant une charge surfacique constante et

en changeant l'épaisseur et la fraction volumique proportionnellement. Ainsi, le produit βe est conservé constant, d'où :

$$\text{LAI} = \text{LAI}_0 = \beta\, s\, e/2 = \text{constante.} \tag{5.11}$$

La masse volumique apparente, ρ_p, du combustible, elle, est variable :

$$\rho_p = \beta \times \rho_v \tag{5.12}$$

En calculant la limite de m_x lorsque LAI tend vers LAI_0 à l'aide du modèle semi-physique, on obtient :

$$\lim_{LAI \to LAI_0} (m_x) = \frac{\tau_0 B T^4}{n \rho_v \Delta h}\left(1 - \frac{S_e}{(LAI)^{\frac{1}{2}}}\right) - \frac{c_p(T_i - T_a)}{\Delta h} = \text{constante} \tag{5.13}$$

Le modèle semi-physique prédit qu'un LAI constant conduit vers un seuil d'extinction constant même pour une masse volumique apparente variable. Cette tendance est confirmée par le modèle de Wilson qui montre que pour la même végétation, la réussite de la propagation du feu est indépendante de la masse volumique apparente [19]. Ainsi, pour un LAI et une charge surfacique constants, le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson prédisent la même tendance : un seuil d'extinction constant.

La figure 5.15 représente, en 3D, le seuil d'extinction évalué en fonction de l'épaisseur de lit du combustible et la fraction volumique. Pour cela, le modèle semi-physique et FireStar2D pour l'herbe « australienne » avec une charge surfacique de 0,7 kg m^{-2} et un LAI constant de 2,8 sont utilisés. Les deux approches prédisent un seuil d'extinction constant pour un produit βe constant et ainsi un LAI constant. Ces résultats confirment donc que le LAI est un facteur déterminant de la réussite de la propagation d'un feu.

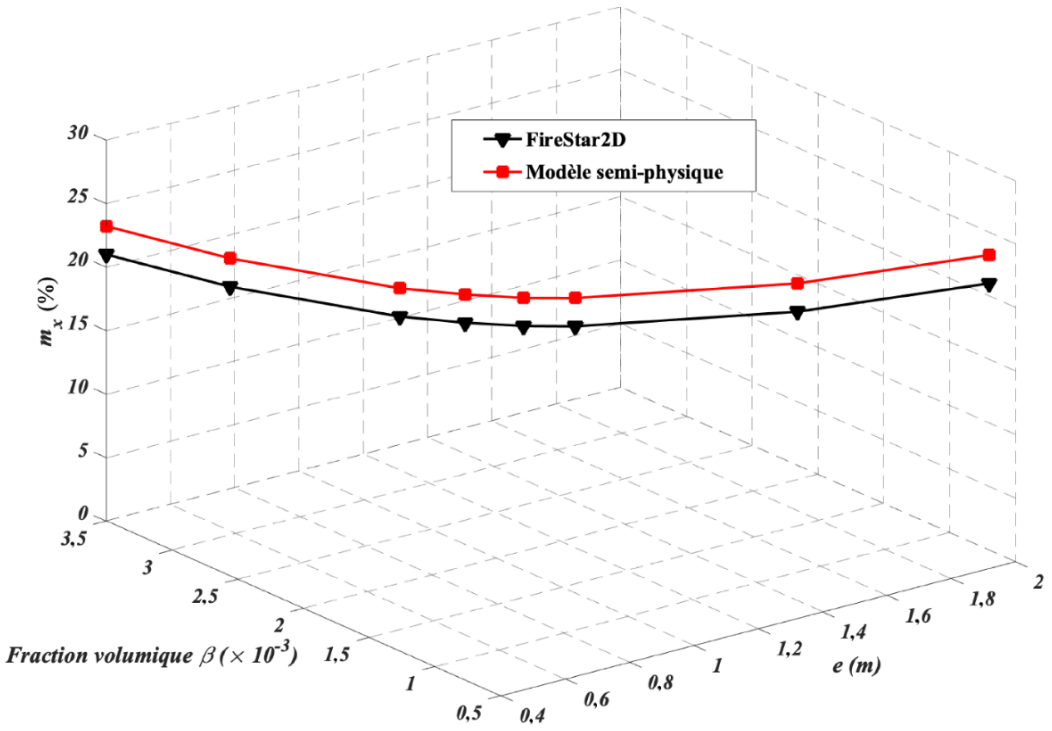


Figure 5.15 *Teneur en eau d'extinction théorique en fonction de l'épaisseur de lit du combustible et de la fraction volumique évaluée à l'aide du modèle semi-physique et FireStar2D pour l'herbe « australienne » ayant un LAI constant égale à 2,8.*

V.4 Influence du vent

Dans la pratique, dans la plupart des cas, un feu se propage sous condition d'un vent faible ou même plus fort mais jamais sous condition d'un vent nul. Il est même admis que les feux de surface ont tendance à propager dans un régime dominé par le vent [18,47,126,181,182,249]. Ce paragraphe décrit une étude dédiée à évaluer numériquement l'effet du vent sur la teneur en eau du combustible au-dessus de laquelle le feu ne peut plus se propager. Ce travail permet également de délimiter un domaine de validité du critère semi-physique de non-propagation des feux, c'est-à-dire d'identifier l'erreur commise lorsque l'on utilise cette approche en dehors des conditions de vent nul. Pour cela, des simulations numériques sont conduites avec le code complet FireStar2D pour l'herbe « australienne » avec une épaisseur de combustible de 70 cm. Six vitesses de vent seront testées : 0 ; 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 1,25 et 1,5 m s^{-1}. La valeur maximale choisie correspond à une différence de pourcentage :

$\frac{mx(U) - mx(0)}{mx(U)}$ < 50 %, avec $m_x(U)$ la teneur en eau d'extinction évaluée pour un vent d'intensité U et $m_x(0)$ est la teneur en eau d'extinction évaluée pour un vent d'intensité nulle.

Les résultats présentés dans le tableau 5.7 montrent que l'extinction du feu dépend notablement de la vitesse du vent. En effet, une différence de 47,6 % est obtenue entre la teneur en eau d'extinction évaluée pour une vitesse de vent de 1,5 m s^{-1} et celle obtenue pour un vent nul. Une différence de moins de 10 % (9,5 %) est obtenue pour une vitesse de vent égale à 0,5 m s^{-1}. Ainsi, deux zones peuvent être délimitées : une zone pour des vitesses de vents faibles (< 0,5 m s^{-1}) où la variation de la valeur du vent n'impacte pas fortement le seuil d'extinction et une autre zone pour des vitesses de vents plus forts (> 0,5 m s^{-1}) où la variation du vent impacte notablement ce seuil.

Tableau 5.7 *Teneur en eau d'extinction du combustible évaluée à l'aide FireStar2D pour le cas de l'herbe australien d'épaisseur 70 cm et évaluée pour 6 valeurs du vent (0 ; 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 1,25 et 1,5 m s^{-1}).*

U_{10} (m s^{-1})	***$m_x(U)$* (%) FireStar2D**	***$(m_x(U) - m_x(0))/m_x(U)$* (%) FireStar2D**	***$m_x(U)$* (%) *Modèle semi-physique***
0	21	0	24
0,1	21	0	-
0,5	23	9,5	-
1	25	19	-
1,25	28	33,3	-
1,5	31	47,6	-

Puis, une étude faisant appel au nombre convectif de Byram est également proposée. Le nombre convectif de Byram représente le rapport entre la force de flottabilité ascensionnelle

due à la flamme et la force exercée par le vent. Le nombre convectif de Byram est donné par [18] :

$$N_C = \frac{2\,g\,I}{\rho_0\,C_{P0}\,T_a\,(U_{10}-ROS)^3} \tag{5.14}$$

avec I l'intensité de la ligne de feu, g l'accélération de la pesanteur, ρ_0 la masse volumique de l'air et C_{P0} la capacité calorifique de l'air à température ambiante.

Dans cette étude, le nombre convectif de Byram est calculé pour plusieurs teneurs en eau de la végétation. La figure 5.16 représente ainsi le rapport adimensionnel ROS/U_{10} en fonction de l'inverse du nombre de convectif de Byram ($1/N_c$) pour quatre vitesses de vent (0,5 ;1 ;1,25 et 1,5 m s^{-1}) déterminé pour l'herbe « australienne ». La figure 5.16 montre deux comportements différents : une diminution rapide du ROS/U_{10} en fonction de $1/N_c$ pour un vent inférieur à 0,5 m s^{-1} et une décroissance moins forte de ce rapport pour des valeurs de vents plus importants. Donc, pour un vent faible (< 0,5 m s^{-1}), la vitesse de propagation est beaucoup plus impactée par l'augmentation de m qu'un vent plus fort. En effet, pour des vents calmes ou très faibles, la flamme est penchée dans la direction du combustible brûlé, alors l'air aspiré du côté du combustible non brûlé transmet la vapeur d'eau dégagée à l'intérieure de la zone de combustion et de la flamme ce qui provoque son affaiblissement, et ainsi la diminution brusque de la force de flottabilité. Cependant, pour un vent plus important, la flamme est penchée vers la direction du combustible non brûlé et la vapeur d'eau est poussée loin de la flamme et de la zone de combustion. Ceci explique l'augmentation de m_x avec l'intensité du vent. Ce comportement avait été également mis en avant dans une étude antérieure [18] qui montrait l'importance jouée par la convection sur la réussite de la propagation d'un feu. Finalement, ces résultats permettent de délimiter une valeur maximale pour l'application du critère semi-physique d'extinction égale à 0,5 m s^{-1} qui correspond à une propagation sous condition d'un vent très faible ou un vent calme.

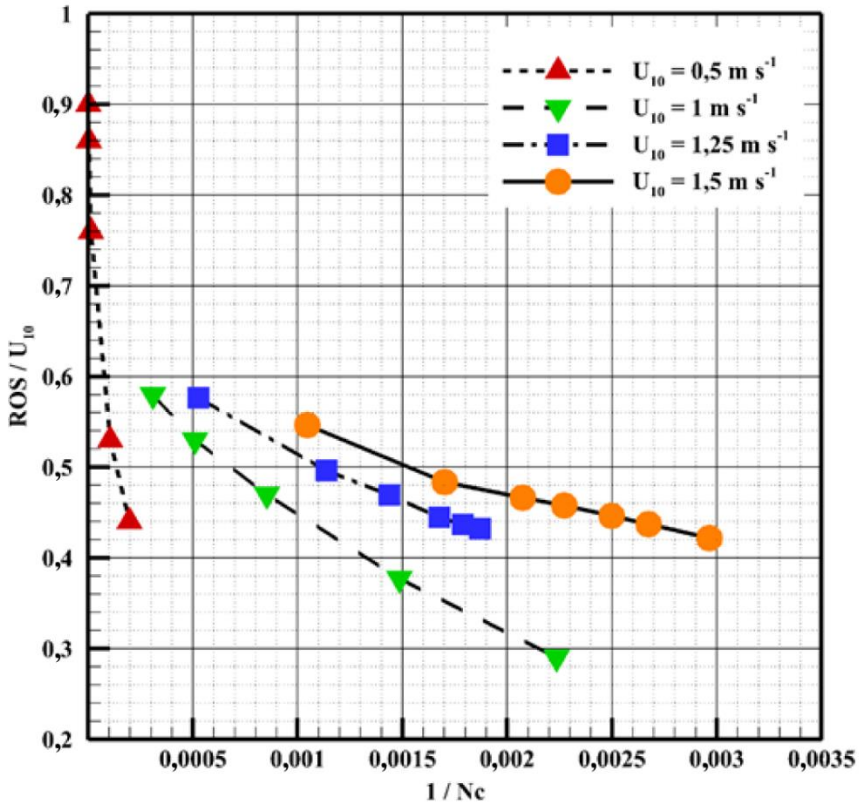


Figure 5.16 *Rapport adimensionnel ROS/U_{10} en fonction de l'inverse du nombre de convectif du Byram 1/N_c, évalué pour quatre vitesses de vent (0,5 ; 1 ; 1,25 et 1,5 m s^{-1}) pour de l'herbe d'épaisseur 70 cm.*

V.5 Conclusion du chapitre et projection sur le chapitre suivant

La réduction du risque incendie passe par une meilleure prédiction du comportement du feu. La communauté scientifique propose des modèles empiriques ou physiques afin de quantifier les différentes caractéristiques d'un front de flammes (vitesse de propagation, hauteur de la flamme, intensité du feu…). Les modèles empiriques sont simples à utiliser et ont des temps de calcul très faibles mais un domaine d'utilisation limité. Les modèles physiques « détaillés ou complets » prennent en compte les mécanismes chimiques et physiques qui se déroulent pendant un incendie mais exigent un temps de calcul qui peut parfois durer plusieurs jours. Le travail effectué dans ce chapitre consiste à tester un modèle semi-physique de

détermination des seuils d'extinction déduit d'une approche physique simplifiée de comportement des feux de surface conçu pour des conditions à plat et sans vent. Cette approche permet donc de déterminer, en temps réel, la vitesse de propagation des feux ainsi que le seuil d'extinction lié à la teneur en eau du combustible en se basant sur ses propriétés et les conditions météorologiques. Le premier objectif fut donc de comparer le modèle semi-physique à une approche physique complète et à une série d'expériences à l'échelle du laboratoire. Le second objectif fut d'étudier l'influence de certaines propriétés des végétaux sur la propagation des feux. Les résultats montrent clairement que le seuil d'extinction lié à la teneur en eau croît avec la charge surfacique de la végétation jusqu'à une valeur limite où il devient indépendant de cette charge. De plus, les résultats montrent que la réussite de la propagation d'un feu dépend directement de la structure du combustible (LAI). Il a été également démontré que le seuil d'extinction du feu est le même pour une famille de combustible qui possède le même LAI et ceci même pour une masse volumique apparente différente.

L'influence de la vitesse du vent sur ce seuil d'extinction, pour des conditions de vent calme, où la flamme est verticale ou penchée dans la direction du combustible brûlé [255], a été aussi étudiée. Cette étude a ensuite permis de déterminer un domaine d'utilisation de la formule analytique en s'étant préalablement fixé une erreur acceptable.

Ce travail a été mené afin de répondre à un besoin des opérationnels qui sont en charge des feux dirigés. Cette étude permet de connaître les valeurs limites de l'épaisseur (charge surfacique) et de la teneur en eau du combustible qui indiquent la réussite ou non d'un feu dirigé sous des conditions marginales.

Le chapitre 6 est une prolongation de cette étude. En effet, la réussite de la propagation d'un feu est étudiée en considérant des vents plus forts. Une étude de l'influence du vent et de la teneur en eau sur le comportement du feu ainsi que l'influence de la charge surfacique et de la vitesse du vent sur le seuil d'extinction est également menée.

Chapitre VI. Étude des feux marginaux à plat et avec vent

L'utilisation des brûlages dirigés est souvent considérée comme très efficace pour réduire le risque incendie [54,55,244,256]. En effet, cette technique permet, par exemple, de diminuer fortement la quantité de combustible sur des zones difficiles d'accès et donc difficilement traitées mécaniquement, de créer des zones de sécurité pour les opérationnels lors des phases de lutte ou de créer des discontinuités dans la végétation pour réduire l'intensité du feu lors de sa propagation. Leur utilisation s'avère donc une nécessité dans la gestion et l'aménagement de certains territoires. Les brûlages dirigés sont également utilisés dans l'agriculture pour préparer les terrains, mais aussi afin de réduire la propagation de certaines maladies, et pour contrôler l'expansion de certaines espèces au profit d'autres [151,246]. Ces feux doivent être caractérisés par une faible intensité pour réduire les effets néfastes sur les écosystèmes (sols, arbres, …). Ils sont donc réalisés dans des conditions marginales et peuvent être dénommés feux marginaux.

Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant dans le document, le comportement d'un feu, une fois déclenché, dépend des conditions météorologiques, topographiques et des propriétés du combustible. Ainsi, pour que ces feux marginaux atteignent les objectifs visés, les

opérationnels doivent tenir compte des différentes conditions de propagation, comme la vitesse du vent, la teneur en eau du combustible ou sa charge surfacique [41,143,257]. En effet, la vitesse et la direction de propagation d'un feu sont fortement corrélées à la vitesse du vent [26,213,258]. De plus, le vent joue un rôle primordial dans la dispersion des fumées produites [150,151] et donc la sécurité des personnes dans les environs. Par exemple, au sud des États-Unis, la vitesse de vent recommandée pour un brûlage dirigé varie entre 0,5 et 7 m s^{-1} (mesurée à 2 m d'altitude) [51]. Une autre condition essentielle à la réussite de la propagation d'un feu marginal est la teneur en eau du combustible. Cette dernière est toujours considérée comme un facteur décisif et critique pour qu'un feu se propage ou ne se propage pas [141,143,181,257]. Effectivement, comme il a été expliqué au chapitre 5, la vitesse du feu et son intensité, sont directement influencées par cette teneur en eau [18,26,144,168]. La charge surfacique du combustible possède également une grande influence sur la réussite de la propagation des feux marginaux. En effet, une étude [257] réalisée pour prédire la réussite de tels feux dans de l'herbe du type « Tasmanian Native », a montré qu'au-dessous d'une charge surfacique limite, le feu perd sa capacité à se propager.

Le chapitre V présente deux modèles qui déterminent la teneur en eau d'extinction d'un feu de surface pour le cas particulier du terrain à plat. Le premier [141] est un critère semi-physique applicable pour tous les végétaux et qui dépend des propriétés du combustible et de la température ambiante. Le deuxième est une formule empirique [19] basée sur des tests expérimentaux réalisés sous conditions bien déterminées. La problématique est que ces deux modèles sont applicables sous conditions d'un vent calme (< 0,5 m s^{-1}) [252]. La littérature montre qu'il existe de nombreux modèles qui prédisent la réussite ou non d'un feu marginal sous condition d'un vent plus fort. Cependant, la plupart de ces modèles sont des fonctions de probabilité [143,181,248] qui ne fournissent pas des valeurs des propriétés du combustible permettant ou non la propagation d'un feu de surface.

En réalité, très peu de travaux de recherche ont été menés et publiés sur la détermination de critères d'extinction d'un feu en fonction des propriétés du combustible et sous condition d'un vent non nul. Ainsi, le but de ce chapitre est d'estimer les propriétés d'un combustible qui déterminent la réussite de la propagation d'un feu de surface à plat et avec des intensités de vent conseillées par les opérationnels pour la réalisation d'un brûlage dirigé. Afin de relier la teneur en eau d'extinction du feu à la vitesse du vent et à la charge surfacique du combustible, de nombreuses simulations numériques à l'aide du code FireStar2D sont utilisées en prenant le cas de prairies couvertes par l'herbe de type « australienne ». Une étude sur l'effet du vent et de la teneur en eau sur le comportement du feu ainsi que sur l'influence du vent et de la charge surfacique sur la teneur en eau d'extinction est réalisée. Finalement, une quantification adimensionnelle de la zone marginale est réalisée à l'aide du nombre convectif de Byram.

VI.1 Présentations des configurations étudiées

Les travaux de ce chapitre sont basés sur un ensemble de 650 simulations numériques, menées avec FireStar2D. Le but premier de cette étude est de relier la teneur en eau d'extinction à la charge surfacique du combustible et à la vitesse du vent. En outre, l'influence de la teneur en eau et de la vitesse du vent sur les caractéristiques de la flamme est étudiée. Finalement, l'influence de la charge surfacique et du vent sur la teneur en eau d'extinction est présentée.

La végétation utilisée est l'herbe « australienne » dont la configuration est présentée au chapitre V, tableau 5.4. La charge surfacique varie entre 0,1 et 0,7 kg m^{-2}. Les différentes simulations sont menées avec une fraction volumique constante de 0,002.

La figure 6.1 représente le domaine de calcul qui est de 170 m de longueur et 35 m de hauteur. La végétation est distribuée d'une manière homogène entre X = 20 m et X = 170 m.

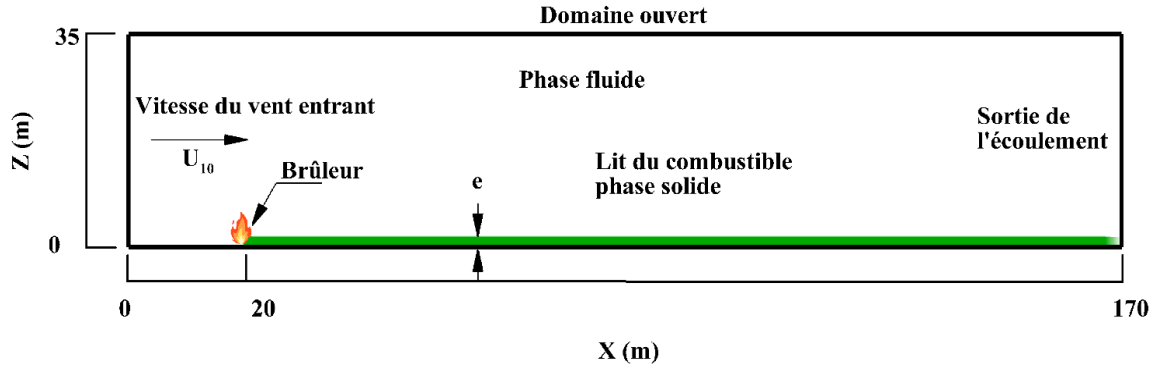


Figure 6.1 *Représentation du domaine des calculs numériques et des conditions limites correspondants aux simulations numériques 2D réalisées avec l'herbe.*

Le vent est imposé à l'entrée gauche du domaine, il est caractérisé par un profil logarithmique. Son intensité donnée à 10 m d'altitude peut varier entre 0 et 10 m s^{-1}. La configuration étudiée est détaillée dans le chapitre V § V.2.1.1.

Choix du critère de non-propagation

Les feux dirigés sont souvent employés pour la création des ouvrages de type « coupe-feux » qui sont appelés en Corse ZAL et ont une largeur de 100 m [51,259] qui est égale à deux fois la distance de sécurité acceptable. Cette technique a pour but d'éliminer le couvert végétal dans une zone de largeur bien spécifique. Le brûlage dirigé employé pour éliminer la végétation doit donc être en capacité de parcourir cette largeur sans s'éteindre. C'est pourquoi une propagation est considérée comme réussie lorsque le feu dépasse une distance de 50 m et atteint pendant cette progression un régime de propagation stationnaire. Pour les cas simulés avec m égale à m_x, le feu n'a réussi à se propager que sur une distance maximale de 15 à 30 m. Cela est dû au fait que le brûleur reste allumé pendant 5 s, ce qui donne une quantité d'énergie au front de la flamme qui avance de quelques mètres avant que le feu ne s'éteigne.

La figure 6.2 montre le front de pyrolyse obtenu pour l'herbe de hauteur 50 cm sous une vitesse de vent U_{10} = 4 m s^{-1}. La figure 6.2 montre que le feu perd sa capacité à se propager pour une teneur en eau supérieure à 149 %. Pour cette valeur limite de 149 %, le feu se propage sur 41 m avant de s'éteindre. Une propagation stable est obtenue pour une teneur en eau m = 148 %, ce

qui permet de calculer le ROS correspondant à une teneur en eau inférieure de 1 % à celle de la valeur seuil d'extinction. La vitesse de propagation du front de flammes est ainsi obtenue en déterminant la pente de la droite représentant la position du front de pyrolyse, alors pour m = 148 %, ROS = 0,308 m s^{-1}.

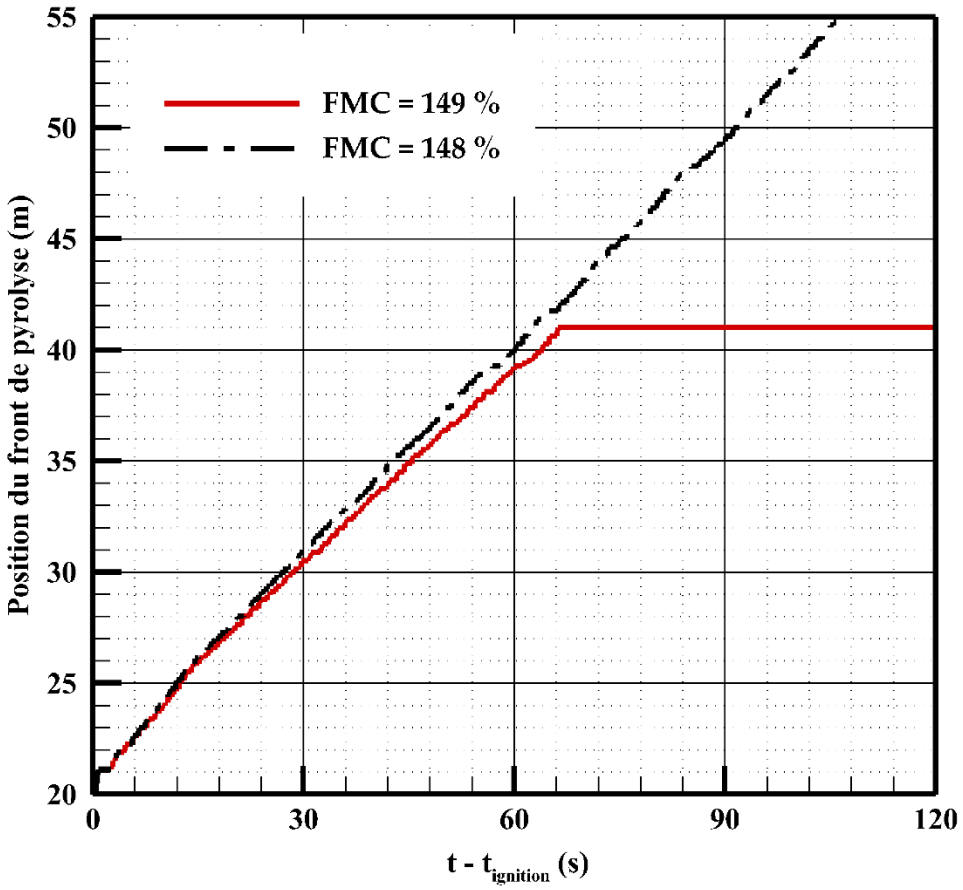
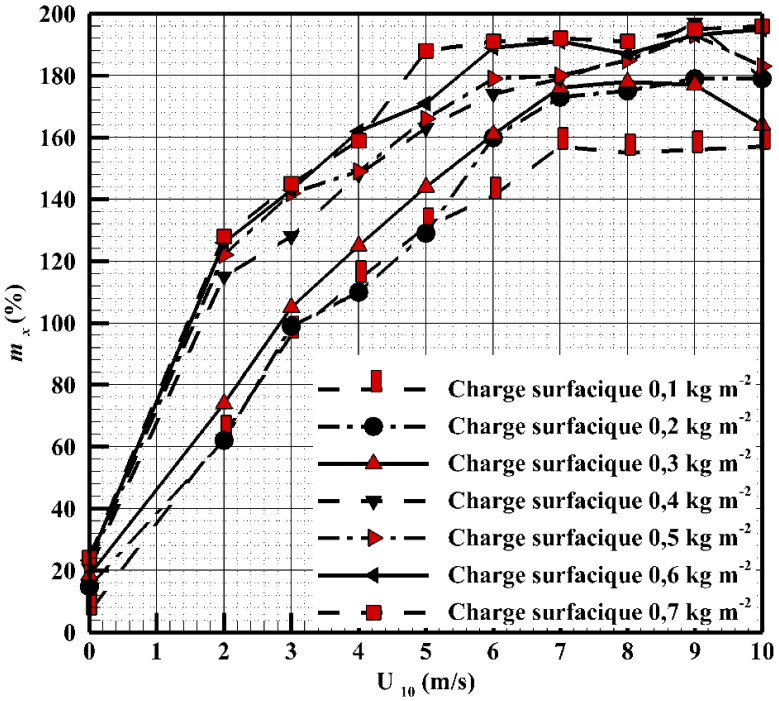


Figure 6.2 *Évolution du front de pyrolyse en fonction du temps obtenue avec FireStar2D pour l'herbe « australienne » d'épaisseur 50 cm, sous condition d'un vent de 4 m s^{-1} et pour deux teneurs en eau : 148 et 149 %.*

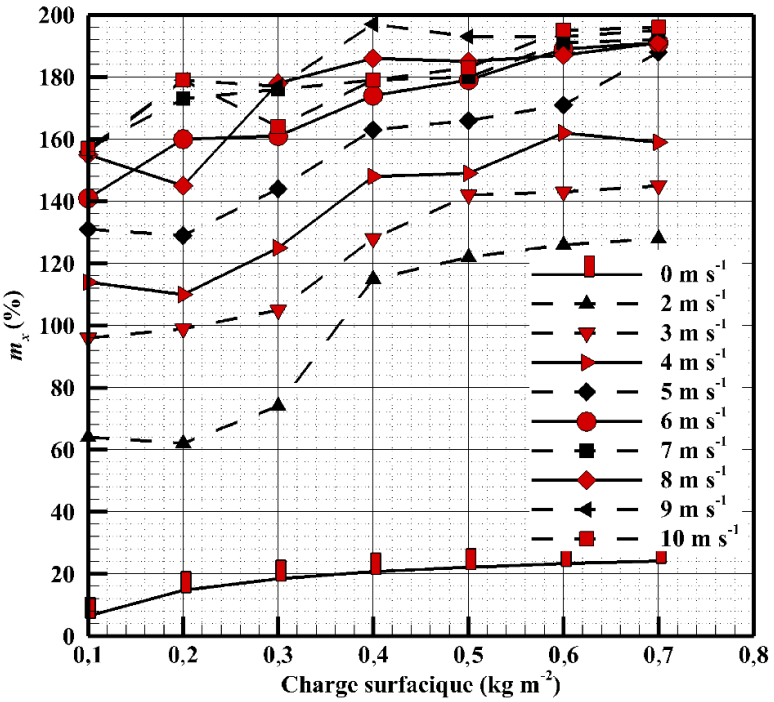
VI.2 L'influence de l'intensité du vent et de la teneur en eau sur le comportement du feu

Comprendre l'interaction entre le vent et le front de flammes est un élément essentiel pour la prédiction du comportement d'un feu. De précédentes études [174,209,228,260] ont proposé l'existence de deux régimes de propagation en fonction de l'intensité du vent : un

régime dominé par le rayonnement, ce qui est le cas des propagations sous condition de vitesse de vent très faibles, ou les propagations à contrevent, et un autre dominé par la convection, c'est le cas de propagations sous conditions de vents forts. Ainsi, Cheney et Gould [174] ont montré deux comportements du ROS en fonction de l'intensité du vent : une augmentation suivant une fonction linéaire pour des vents d'intensité modérée et une croissance suivant une fonction en puissance avec un exposant $p < 1$ pour des vents plus forts. Ce résultat est confirmé par une autre étude effectuée par Fogarty et Alexander en 1999 [255] portant sur l'effet du vent sur la propagation des feux d'herbe pour plusieurs teneurs en eau du combustible. Pour cette étude, l'intensité du vent variait de 0,5 à 85 km h^{-1} à 10 m d'altitude. Lors de ce travail, les auteurs ont pu ainsi montrer deux autres comportements du ROS en fonction de l'intensité du vent : pour des intensités de vent très faibles et des intensités très fortes, le ROS était indépendant de l'intensité du vent, alors qu'entre les deux zones, le ROS variait linéairement en fonction de l'intensité du vent. Comme cela a déjà été traité aux chapitres II et V, le comportement du feu dépend également directement de la teneur en eau de la végétation. Ainsi, cette partie du document porte, dans un premier temps, sur l'étude de l'influence du vent sur le comportement d'un feu marginal qui se propage dans une végétation avec une teneur en eau élevée puis sur l'influence de la charge surfacique sur ce comportement. Dans ce but, 650 simulations ont été menées à l'aide de FireStar2D. La variation de la valeur maximale de la teneur en eau du combustible au-dessus de laquelle le feu perd sa capacité de se propager est évaluée pour l'herbe « australienne » en fonction de l'intensité du vent mesuré à 10 m d'altitude pour différentes charges surfaciques, les résultats sont représentés dans les figures 6.3a et 6.3b.



(a)



(b)

Figure 6.3 *Évolution de la teneur en eau d'extinction de l'herbe en fonction (a) de la vitesse de vent mesurée à 10 m d'altitude et (b) en fonction de la charge surfacique.*

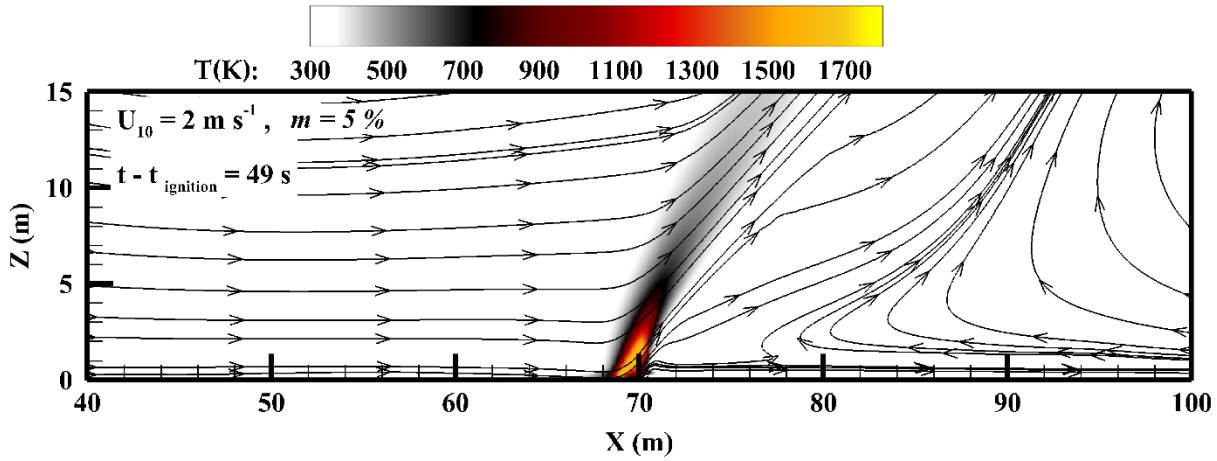
La figure 6.3a montre deux comportements du seuil d'extinction en fonction du vent : pour des intensités de vent modérées (U_{10} < 6 m s^{-1}), le seuil d'extinction est proportionnel à

l'intensité du vent. Cependant, pour des vent plus forts (U_{10} > 6 m s^{-1}), ce seuil est indépendant de l'intensité du vent. Les mêmes tendances sont observées, sur la figure 6.3b, en ce qui concerne la variation de la teneur en eau d'extinction en fonction de la charge surfacique σ du combustible : m_x augmente avec la charge surfacique jusqu'à qu'elle atteigne une asymptote horizontale pour des valeurs supérieures à 0,5 kg m^{-2}.

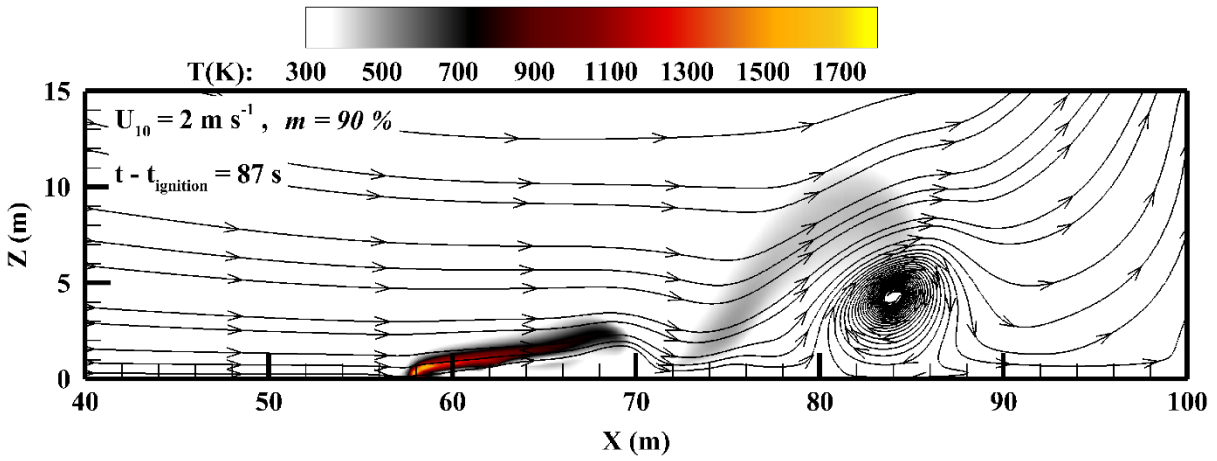
VI.2.1 Influence du vent sur la teneur en eau d'extinction du feu

Cette étude est réalisée en faisant appel au nombre convectif de Byram Nc [261] afin d'identifier le régime de propagation du feu. Le nombre convectif de Byram représente le rapport entre la force de flottabilité de la flamme, causée par la différence de température entre les gaz chauds dégagés et l'air ambiant, et la force d'inertie exercée par le vent. Les détails de calcul sont représentés dans le chapitre V § V.4. Ainsi, pour de grandes valeurs de Nc (> 10), le régime de propagation est considéré dominé par la flamme alors que la propagation est considérée dominée par le vent pour des faibles Nc (< 2).

Les simulations sont tout d'abord réalisées pour des vents inférieurs à 6 m s^{-1} (U_{10} < 6 m s^{-1}), avec une faible teneur en eau (< 5 %) et pour les différentes charges surfaciques. Pour ces configurations, la propagation est parfois dominée par la flamme ou bien régie par un régime transitoire oscillant entre une propagation dominée par la flamme ou par le vent. En effet, le nombre convectif de Byram diminue avec une augmentation du vent et également avec une forte teneur en eau [18]. Par conséquent, une augmentation combinée du vent et de *m* provoque la réduction de la force de flottabilité. La flamme étant ainsi beaucoup plus influencée par l'action du vent, sa longueur augmente et elle se penche de plus en plus vers la végétation non brûlée. Ces phénomènes sont illustrés dans les figures 6.4 et 6.5 qui représentent les champs de température pour deux cas de vitesses de vent (U_{10} = 2 m s^{-1} ; U_{10} = 4 m s^{-1}) et pour deux valeurs de *m* (5 et 90 %).

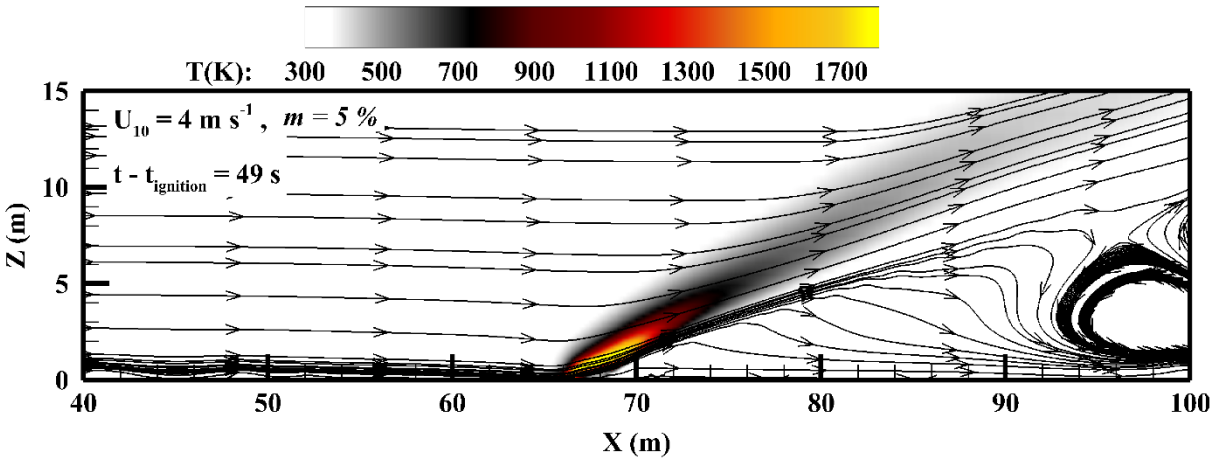


(a)

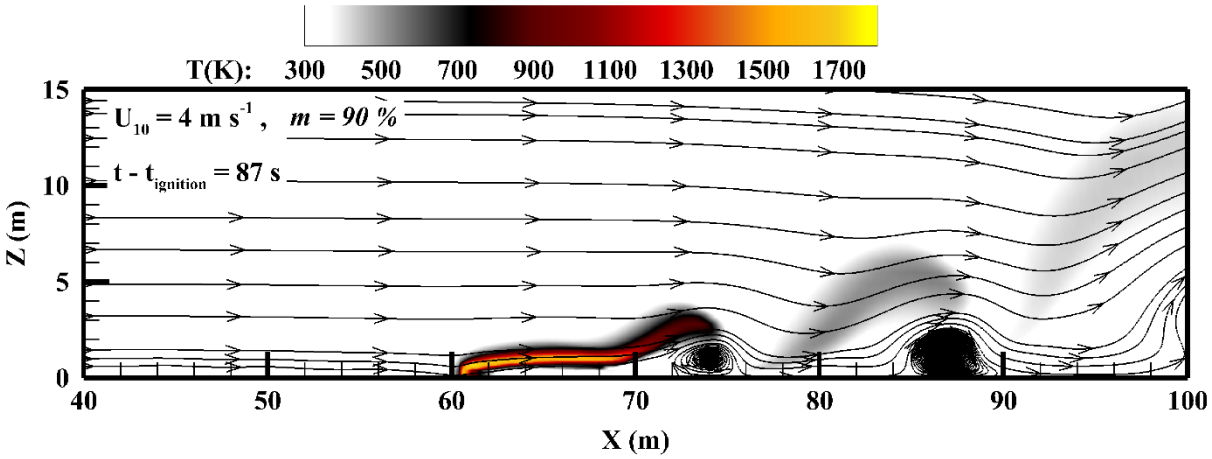


(b)

Figure 6.4 *Champs de température et lignes de courant de l'écoulement (dans les directions X et Z) évalués pour U_{10} = 2 m s^{-1}, e = 0,5 m (δ = 0,5 kg m^{-2}, et pour deux valeurs de m (a) m = 5 %, (b) m = 90 %.*



(a)



(b)

Figure 6.5 *Champs de température et lignes de courant de l'écoulement (dans les directions X et Z) évalués pour U_{10} = 4 m s^{-1}, e = 0,5 m (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour deux valeurs de m (a) m = 5 %, (b) m = 90%.*

Les figures 6.4 et 6.5 montrent qu'une augmentation de la vitesse du vent de 2 à 4 m s^{-1} provoque l'augmentation de l'angle d'inclinaison de la flamme qui se penche de plus en plus vers le combustible non brûlé. Il est à noter que la profondeur du front de flammes augmente également. De même, lorsque la teneur en eau augmente, la force de flottabilité diminue, la longueur de la flamme augmente et elle tend de plus en plus vers le combustible non brûlé. Les résultats présentés dans la figure 6.6, montrent l'influence de la teneur en eau sur la fraction massique de l'oxygène et la température de la flamme. Deux valeurs de *m* sont étudiées : 5 et 90 %.

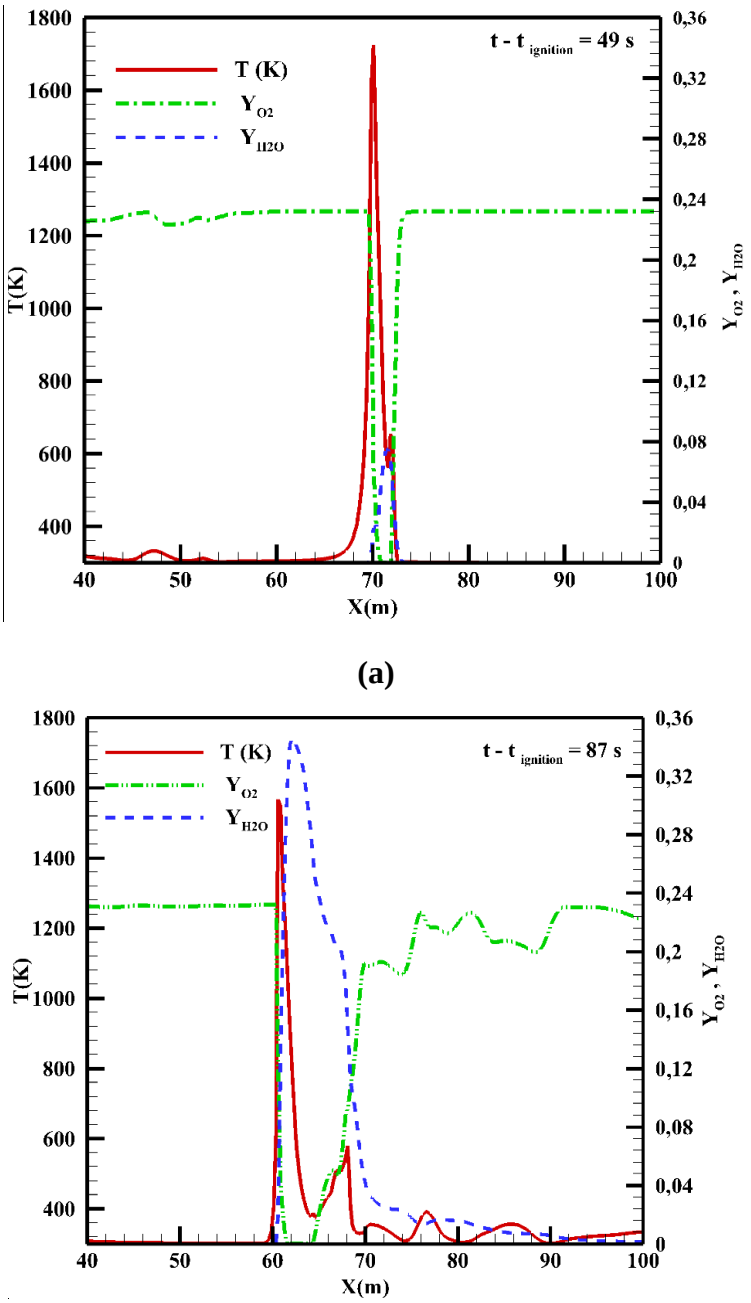


Figure 6.6 *Profils de température du gaz, de la fraction massique de l'O_2 et de la vapeur d'eau dans le mélange gazeux évalués à la surface de la végétation (z = e) pour e = 0,5 m (σ = 0,5 kg m^{-2}), U_{10} = 4 m s^{-1} et pour deux valeurs de m : (a) m = 5 %, (b) m = 90 %.*

La température de la flamme diminue avec l'augmentation de *m*, ceci peut s'expliquer par le fait qu'une partie de l'énergie est perdue pour l'évaporation de l'eau contenue dans la végétation. De plus, la vapeur d'eau dilue la concentration des produits volatiles et des suies produites qui rayonnent [178]. La figure 6.6 montre aussi que, dans le cas de *m* = 90 %, et pour

une inclinaison de la flamme plus importante, un pré-réchauffement du combustible a lieu quelques mètres en aval de la zone de combustion. D'autre part, l'augmentation de *m* entraîne également la production d'une quantité plus importante de vapeur d'eau ce qui cause la dilution de l'oxygène dans le mélange gazeux situé en aval de la flamme, ce qui peut causer l'extinction du feu lorsque *m* atteint une certaine valeur seuil.

Pour des vitesses de vent plus importantes, $U_{10} \geq 7$ m s^{-1}, la plupart des configurations simulées sont des feux dominés par le vent, ayant un Nc < 2 ou très proche de 2. Pour ce type de feu, la longueur de la flamme est grande même pour de faibles valeurs de *m*. Les figures 6.7 et 6.8 montrent que l'augmentation de l'intensité du vent ou de *m* entraînent une diminution de la hauteur de la flamme ainsi que l'augmentation de son angle d'inclinaison.

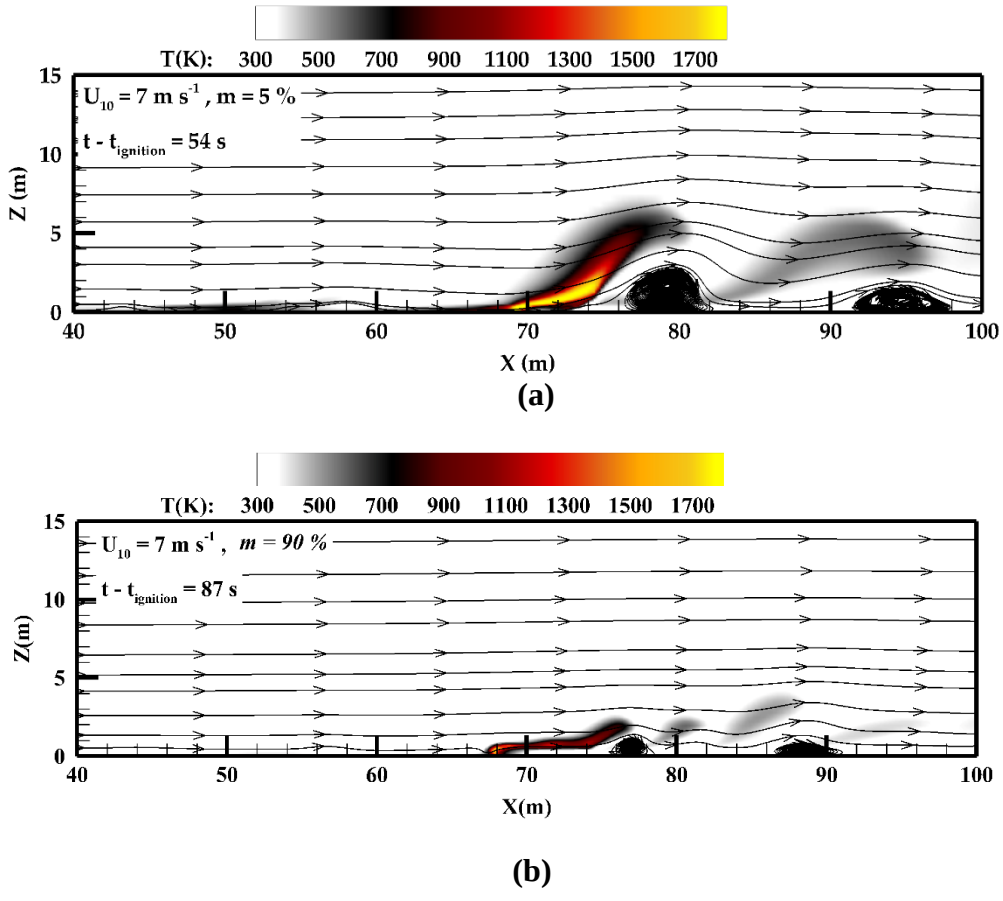


Figure 6.7 *Champs de température et lignes de courant de l'écoulement (dans les directions X et Z) évalués pour U_{10} = 7 m s^{-1}, e = 0,5 m (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour deux valeurs de m (a) m = 5 %, (b) m = 90 %.*

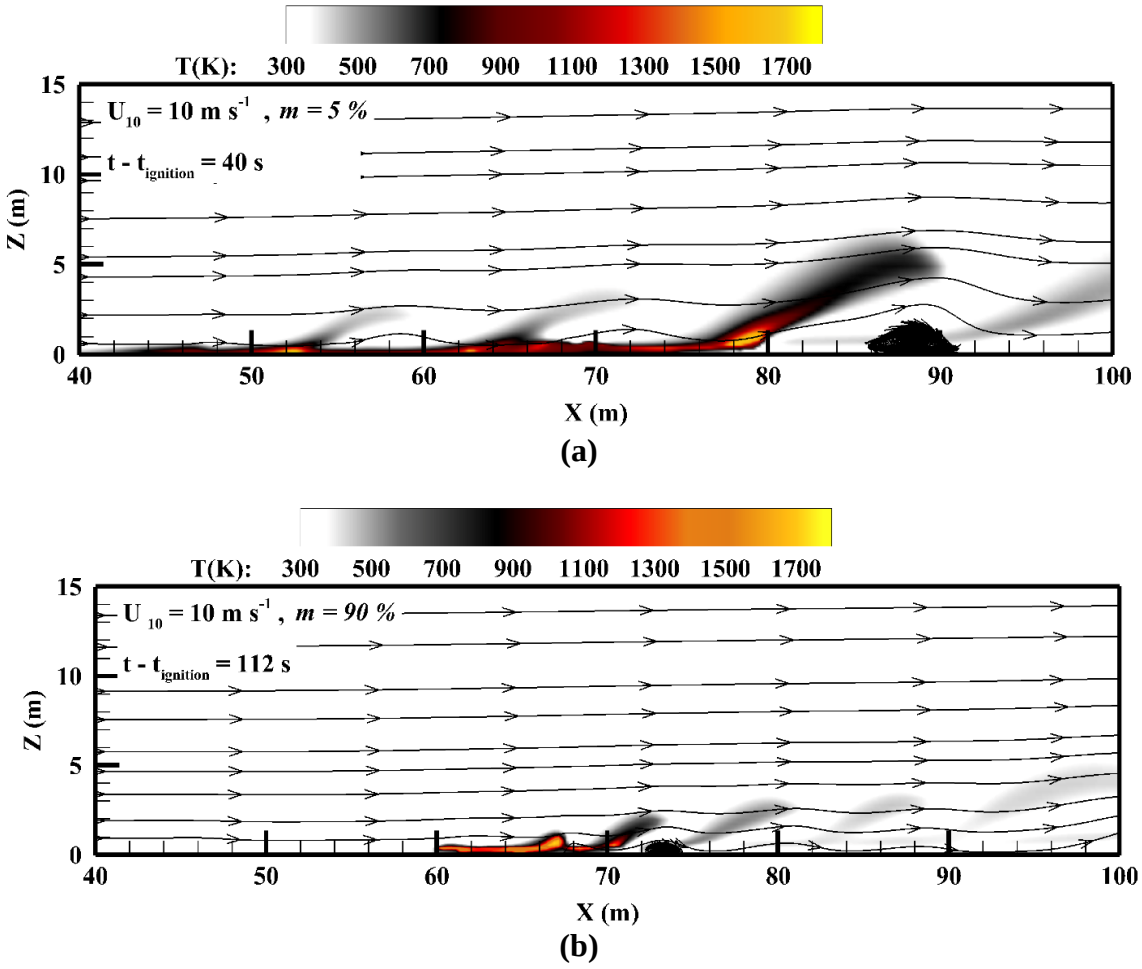


Figure 6.8 *Champs de température et lignes de courant de l'écoulement (dans les directions X et Z) évalués pour U_{10} = 10 m s^{-1}, e = 0,5 m (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour deux valeurs de m (a) m = 5 %, (b) m = 90 %.*

La valeur quasi-constante de la teneur en eau d'extinction en fonction de la vitesse dans le cas de vents forts (U_{10} > 6 m s^{-1}) peut être expliquée par un affaiblissement de la force de flottabilité avec l'augmentation de *m*. Ceci est causé par la perte d'une quantité de l'énergie produite pour l'évaporation de l'eau contenue dans la végétation, ainsi que la présence importante de vapeur d'eau dans la zone de combustion qui réduit ainsi la concentration de l'oxygène dans le mélange gazeux.

VI.2.2 Influence de la charge surfacique sur la teneur en eau d'extinction du feu

Des études antérieures ont montré que le comportement du feu et surtout sa vitesse de propagation dépendent également de la charge surfacique du combustible [47,170,182,258]. En effet, la charge surfacique ou l'épaisseur du combustible sont des facteurs essentiels qui aident à déterminer la nature thermique du milieu de propagation : épais ou mince [212,262]. Une étude de la propagation du feu dans un milieu poreux [262] réalisée avec des plaques de PMMA, (poly méthacrylate de méthyle), a ainsi pu mettre en évidence qu'au-dessous d'une certaine épaisseur de la plaque (épaisseur limite), la vitesse de propagation est inversement proportionnelle à cette épaisseur (milieu thermiquement mince). Si l'épaisseur de la plaque est supérieure à cette valeur limite, la vitesse atteint alors une valeur constante et devient indépendante de l'épaisseur (milieu thermiquement épais) [212]. Ainsi, le mode de propagation du feu dépend d'une épaisseur optique critique (6.1), qui détermine la nature thermique du milieu de propagation. Cette épaisseur optique critique est évaluée par :

$$\tau_{opt} = \frac{s\beta e}{4} \qquad (6.1)$$

La figure 6.3b montre que m_x augmente avec la charge surfacique jusqu'à une valeur seuil de 0,5 kg m^{-2} à partir de laquelle m_x tend vers une constante et devient indépendante de cette charge. Ce comportement est similaire à celui mis en évidence lors de la propagation dans un milieu poreux détaillé plus haut.

Les simulations sont effectuées avec FireStar2D en utilisant la configuration de l'herbe sous condition d'un vent de 2 m s^{-1} et une teneur en eau du combustible de 10 %. La fraction volumique est maintenue constante à 0,002 pendant les différents tests numériques, tandis que l'épaisseur du combustible peut varier de 0,1 à 0,7 m. Pour des végétations thermiquement minces (τ_{opt}< 1), obtenues pour e < 0,5 m (charge surfacique < 0,5 kg m^{-2}), l'intégralité de

l'épaisseur du combustible participe à la propagation. Dans ce cas, m_x augmente avec la charge surfacique. Pour des charges surfaciques plus importantes, le flux radiatif n'arrive pas à pénétrer à travers toute l'épaisseur du combustible. Donc, les couches inférieures du combustible ne sont pas assez chauffées pour participer à la propagation [263]. Dans ce cas, m_x devient moins dépendantes de la charge surfacique. Pour conforter cette analyse, le flux radiatif est examiné en un point du combustible non brûlé à une hauteur de 10 cm du sol et situé à une distance d'un mètre devant la flamme.

La figure 6.9 montre que le flux radiatif en ce point diminue fortement de 15,26 kW m^{-2} à 2,36 kW m^{-2} avec l'augmentation de la hauteur du lit du combustible de 0,2 à 0,7 m. De plus, deux comportements sont observés en fonction de cette épaisseur. Il est à noter que les deux domaines sont délimités par l'épaisseur optique : $\tau_{opt} = 0{,}8 < 1$ pour e = 0,4 m.

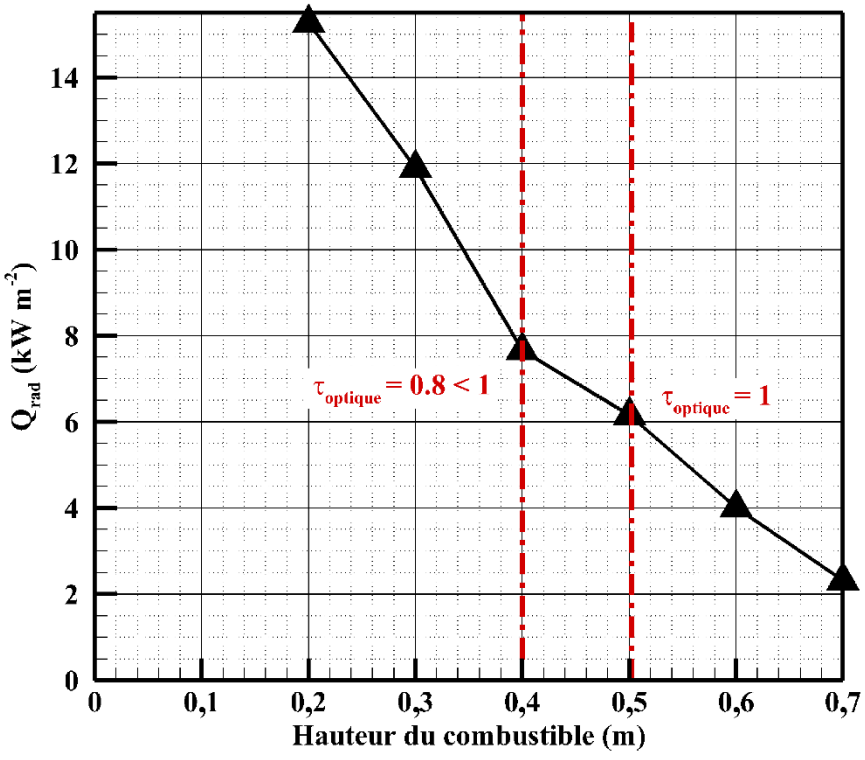


Figure 6.9 *Flux radiatif reçu par un point du combustible non brûlé de coordonnées (70 m, 0,1 m) obtenu sous condition d'un vent U_{10} = 2 m s^{-1}, m = 10 %, et pour les différentes charges surfaciques lorsque la flamme est située à X = 69 m.*

VI.3 Détermination d'une loi empirique pour la détermination de la teneur en eau d'extinction du feu

La réussite des feux dirigés est normalement prédite grâce à des fonctions de probabilités obtenues à l'aide d'une base de données expérimentales et pour des combustibles précis [143,181,183,257]. Ce type d'études montrent que cette réussite dépend des propriétés de la végétation et des conditions météorologiques. Dans le but d'obtenir une loi empirique qui donne la teneur en eau d'extinction des feux en fonction de la charge surfacique et à l'intensité du vent, 70 points correspondants aux seuils d'extinction présentés dans la figure 6.3 sont utilisés. Les charges surfaciques et les intensités du vent à 10 m d'altitude étudiées varient respectivement de 0,1 à 0,7 kg m^{-2} et 0 à 10 m s^{-1}. La relation (6.2) est obtenue grâce à l'application de la méthode des moindres carrés non linéaire de "Levenberg-Marquart" [264]. La teneur en eau maximale pour laquelle le feu se propage m_x est ainsi donnée par l'expression ci-dessous :

$$m_x - m_{x0} = 46{,}53\ \sigma^{1{,}765} + 58{,}83\ U_{10}^{0{,}445} \qquad (6.2)$$

$$m_{x0} = \frac{\tau_0 B T^4}{n \rho_v \Delta h}\left(1 - \frac{S_e}{\sqrt{2\ LAI}}\right) - \frac{c_p (T_i - T_a)}{\Delta h} \qquad (6.3)$$

Avec σ la charge surfacique exprimée en kg m^{-2} , U_{10} la vitesse de vent mesurée à 10 m d'altitude, $m_{x0,}$ la teneur en eau obtenue pour une vitesse de vent nulle à l'aide du modèle semi-physique proposé par Balbi *et al*. [141] et détaillé en chapitre 2, S_e = 0,47 une constante universelle, LAI le " leaf area index" ($LAI = \beta.s.e/2$), ρ_v la masse volumique du combustible exprimée en kg m^{-3}, B est la constante de Stefan-Boltzmann (W m^{-2} K^{-4}), c_p la chaleur spécifique du combustible (J kg^{-1} K^{-1}), Δh l'enthalpie de vaporisation (J kg^{-1}), T la température moyenne de la flamme (K), T_i et T_a respectivement la température d'ignition et la température ambiante (K) et τ_0 = 75591 s m^{-1} un paramètre utilisé pour déterminer le temps de résidence de la flamme [120].

Le calcul de R^2 donne une valeur de 0,977 entre les résultats fournis par ce modèle empirique et ceux calculés avec le code complet FireStar2D.

VI.4 Influence du vent et de la teneur en eau sur les caractéristiques de la flamme

Le § VI.3 met en évidence l'influence du vent sur le comportement du feu. Dans ce quatrième paragraphe, l'influence du vent sur les caractéristiques de la flamme est donc étudiée. La figure 6.10 montre la dépendance entre *m* et le temps de résidence τ. Pour une vitesse de vent supérieure ou égale à 4 m s^{-1}, on peut constater que la courbe est divisée en deux partie : une partie où τ diminue avec l'augmentation de *m* ($m < 30 – 40$ %) et une autre partie où ce temps de résidence augmente avec *m* ($m > 30 – 40$ %). Ce comportement a déjà été montré numériquement dans la littérature [18] pour de l'herbe d'une hauteur de 70 cm et en utilisant FireStar2D. Il peut être remarqué que pour des vitesses de vent moins grandes (U_{10} = 1 m s^{-1}), seule la première partie de la courbe est observée car le feu atteint son seuil d'extinction pour une valeur inférieure à 30 %.

Afin de mieux comprendre ce comportement, une étude complémentaire est réalisée en utilisant le nombre convectif de Byram Nc. La figure 6.11 représente la variation du nombre de Byram en fonction de *m* et de U_{10}. Pour U_{10} = 1 m s^{-1}, il est possible de voir que Nc diminue lorsque *m* augmente puis le feu s'éteint pour *m* = 20 % correspondant à Nc = 1047. Dans ce cas, les propagations sont dominées par la flottabilité de la flamme. La vapeur d'eau produite dilue l'air qui est aspiré au voisinage de la zone de combustion, ce qui affaiblit la flamme jusqu'à ce que le feu s'éteigne (*m* > 20 %). Pour U_{10} = 4 m s^{-1}, Nc diminue de 22,1 jusqu'à 10 lorsque *m* augmente de 5 à 40 %. Cette dernière valeur de Nc correspond à la transition d'une propagation dominée par la flamme à une propagation dominée par le vent. Pour des valeurs de *m* plus grandes, Nc continue à diminuer et le comportement du feu est encore plus influencé

par la force d'inertie du vent. Dans ce cas, la vapeur d'eau produite est évacuée loin de la zone de combustion par l'action du vent. Cette transition d'un régime de propagation à l'autre peut certainement expliquer la tendance mise en évidence par la figure 6.10 pour τ. L'aspiration de l'air dilué vers la zone de combustion pour les régimes dominés par la flamme et l'évacuation de la vapeur d'eau de la zone de combustion pour les régimes dominés par l'action du vent sont confirmés grâce à l'évolution de la fraction massique de H_2O qui figurent respectivement dans les figures 6.12a et 6.12b. En effet, pour U_{10} = 2 m s^{-1} et m = 5 %, la figure 6.12a montre bien qu'il n'y a pas de vapeur d'eau devant la flamme car elle est aspirée avec l'air vers la zone de combustion. Or, pour U_{10} = 4 m s^{-1} et m = 90 %, (figure 6.12b), cette vapeur d'eau est évacuée loin de la zone de combustion.

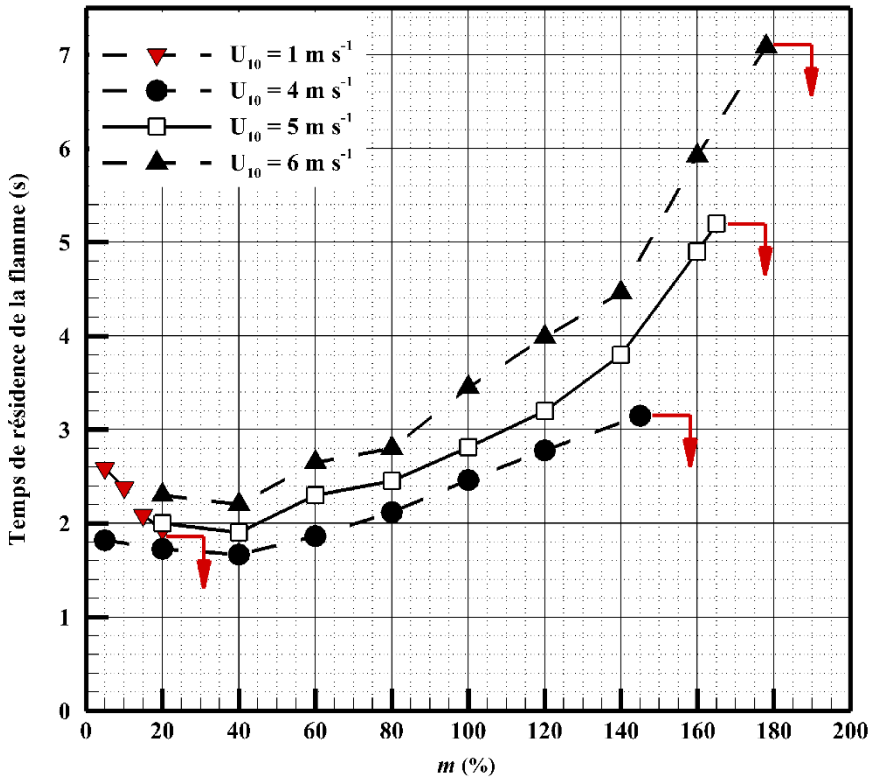


Figure 6.10 *Temps de résidence en fonction de m obtenu pour combustible d'épaisseur 50 cm (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour 4 vitesses du vent. La flèche verticale montre la teneur en eau d'extinction.*

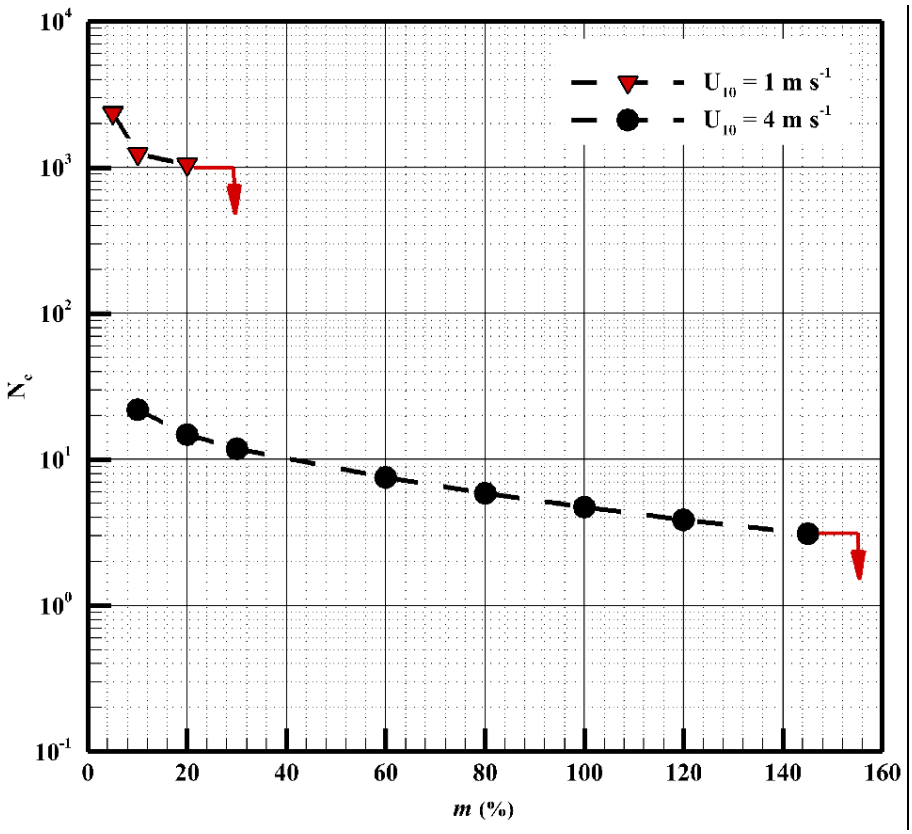
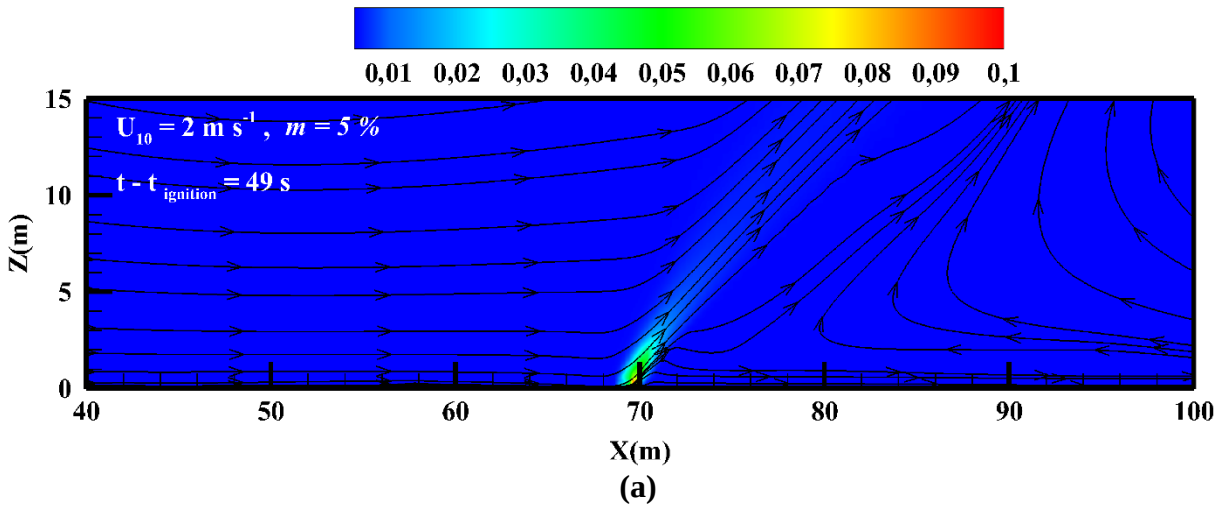
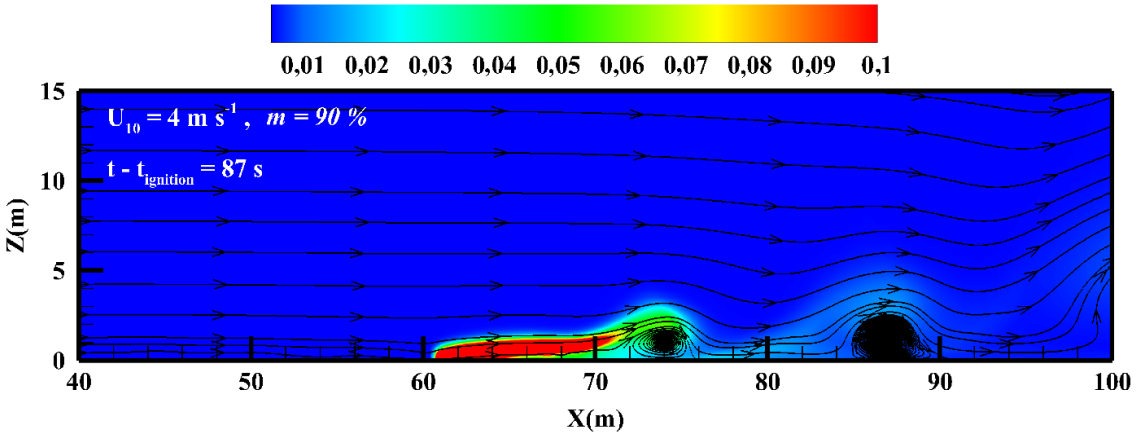


Figure 6.11 *Nombre convectif de Byram en fonction de m obtenu pour un combustible d'épaisseur 50 cm (δ = 0,5 kg m^{-2}) et pour deux valeurs du vent. La flèche verticale montre la teneur en eau d'extinction.*





(b)

Figure 6.12 *Distribution de la fraction massique de H_2O et lignes de courant obtenues pour (a) U_{10} = 2 m s^{-1}, m = 5 %, et e = 0,5 m, (b) U_{10} = 4 m s^{-1},m = 90 %, et e = 0,5 m.*

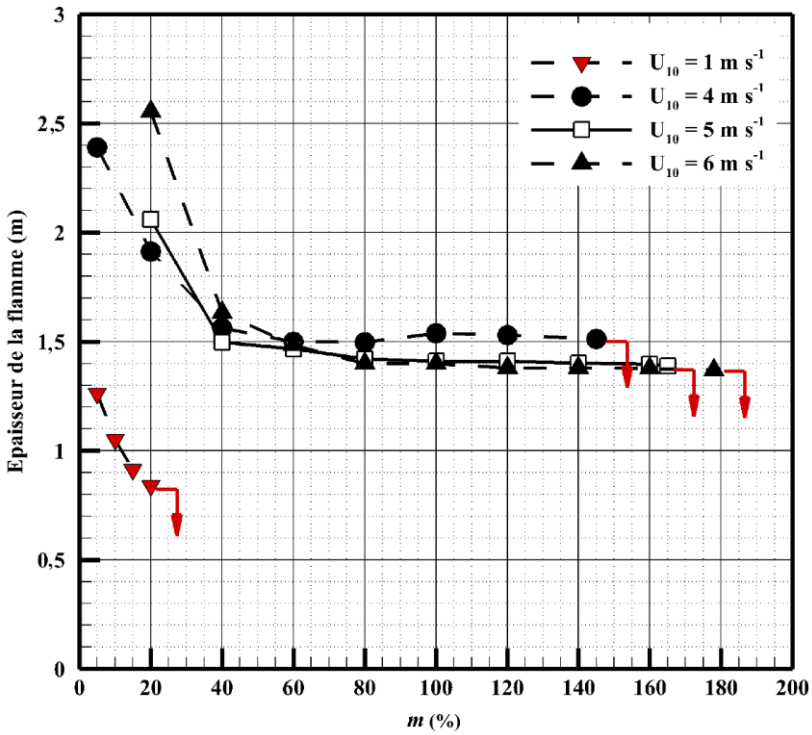


Figure 6.13 *Épaisseur de la flamme en fonction de m obtenue pour combustible d'épaisseur 50 cm (δ = 0,5 kg m^{-2}) pour 4 vitesses du vent. La flèche verticale montre la teneur en eau d'extinction.*

L'épaisseur du front de flammes est également influencée par l'intensité du vent et par la teneur en eau du combustible. Cette épaisseur peut être calculée en utilisant l'expression suivante :

$$L = ROS \times \tau \quad (6.4)$$

En effet, il a été observé que la vitesse de propagation du feu est inversement proportionnel à *m* [18,26,144,265]. Pour un vent faible (U_{10} = 1 m s^{-1}), τ et le ROS sont des fonctions décroissantes par rapport à *m*. Dans ce cas, l'épaisseur de la flamme diminue brusquement avec l'augmentation de *m* jusqu'à l'extinction du feu (figure 6.13). Or, pour des vitesses de vent plus importantes ($U_{10} \geq$ 4 m s^{-1}), le ROS est toujours une fonction décroissante par rapport à *m*. Cependant, pour des *m* < 40 %, τ diminue avec *m* ainsi que l'épaisseur de la flamme pour atteindre une valeur constante pour *m* > 40 %. Alors, τ commence à augmenter avec *m*. L'épaisseur de la flamme est, dans ce cas, indépendante de *m* du fait de l'action opposée du ROS et de τ (figure 6.13).

VI.5 Modélisation adimensionnelle de la teneur en eau marginale

Afin de généraliser l'équation (6.2), le nombre convectif de Byram est évalué pour tous les feux qui ont réussi à se propager. La figure 6.14 montre la variation de *m* en fonction de Nc. Les feux ayant un Nc >10 sont dominés par la flamme et que ceux qui ont un Nc < 2 sont dominés par le vent. Les symboles verts indiquent les configurations marginales, pour lesquelles une augmentation de 1 % de *m* cause l'extinction du feu. La teneur en eau du combustible de ces feux marginaux est donnée en fonction de Nc par l'expression (6.5) :

$$m_{\mathrm{marg}}(\%) = 144 - 15{,}53 \ln(\mathrm{Nc}) \quad (6.5)$$

Du fait de la dispersion des données, l'équation (6.5) montre un coefficient R^2 = 0 ,702 qui est moins précis que (6.2) où R^2 était de 0,977. Par contre, (6.5) permet d'élargir le domaine d'utilisation du modèle théorique. En effet, l'expression (6.5) couvre une large gamme décrivant les différents régimes de propagation d'un feu où 0,05 < Nc < 2500. Mais, elle

nécessite comme entrées les valeurs de ROS et l'intensité de Byram afin de calculer Nc [18,177].

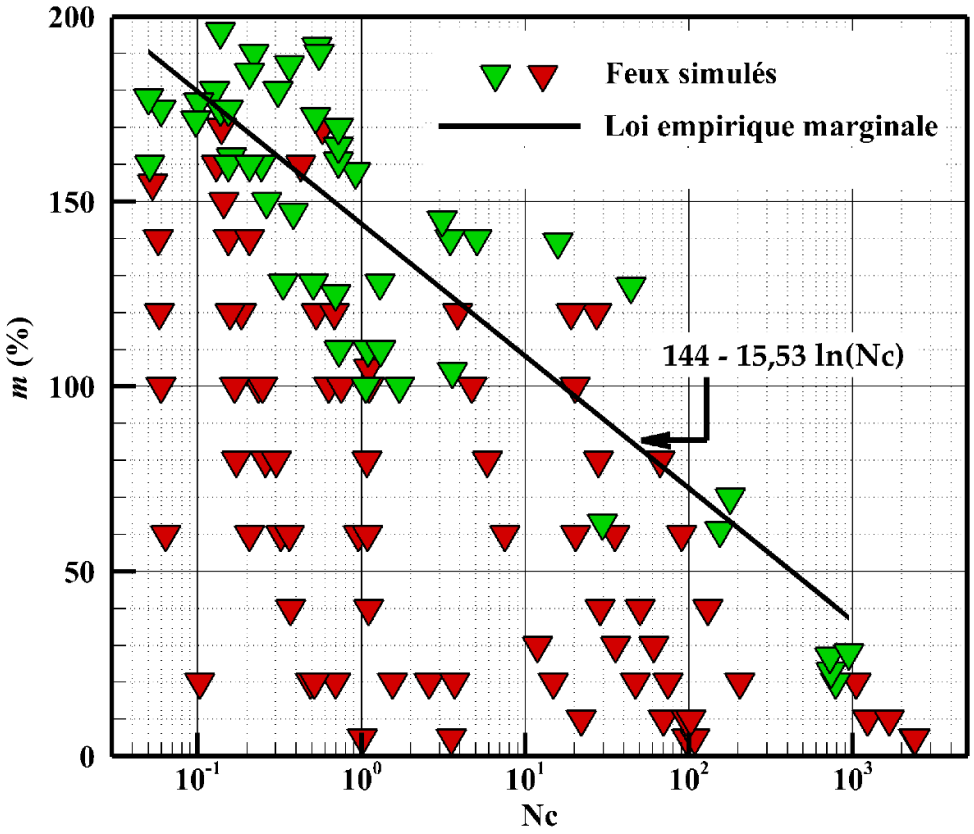


Figure 6.14 *Teneur en eau du combustible en fonction du nombre convectif de Byram. Les symboles en vert correspondent aux configurations des feux marginaux où une augmentation de 1 % de m aboutit à l'extinction du feu. Les symboles en rouge correspondent aux feux qui ont réussi à propager jusqu'à la fin du domaine.*

VI.6 Conclusion

Ce chapitre a pour but la détermination de la teneur en eau limite qui permet une propagation d'un feu de surface en fonction des propriétés du combustible et des conditions météorologiques dans le cas de l'herbe à plat et avec un vent non nul. Ainsi, 650 simulations ont été réalisées, en 2D, à l'aide d'un modèle physique complet basé sur une formulation multiphasique (FireStar2D) et pour une large gamme d'intensité du vent et de charges surfaciques. La teneur en eau d'extinction a été corrélée à la vitesse du vent et à la charge surfacique du combustible en partant d'une teneur en eau limite évaluée pour un vent nul grâce

au modèle semi-physique proposé par Balbi *et al*. [141]. Cette relation empirique a comme principal intérêt de permettre la détermination, rapide et simple, des conditions marginales pour la réussite d'un brûlage dirigé en fonction des paramètres mesurables sur le terrain.

De plus, l'étude montre que le seuil d'extinction en teneur en eau, dénommé m_x, augmente avec la vitesse du vent et la charge du combustible jusqu'à atteindre une valeur asymptotique au-delà de laquelle m_x atteint une valeur seuil et devient indépendante des deux.

L'étude met également en évidence l'effet combiné dû à la vitesse du vent et à la teneur en eau du combustible sur le comportement du feu, en particulier sur les caractéristiques de la flamme. En effet, l'augmentation de m provoque la réduction de la flottabilité de la flamme et rend ainsi la flamme beaucoup plus sensible à la composante horizontale du vent.

Finalement, une loi empirique est également proposée qui évalue la teneur en eau marginale en fonction du nombre convectif de Byram. Cette loi permet d’élargir le domaine d’utilisation de la formule empirique mais nécessite une estimation antérieure de l'intensité de Byram du feu et du ROS.

Conclusions et perspectives

Les feux marginaux de faibles intensités constituent sans doute les feux de végétation les plus utiles pour l'homme, ceci au vu de leur importance dans le domaine de la gestion des territoires et de la réduction du risque incendie avec leur utilisation pour conduire des brûlages dirigés. C'est la raison pour laquelle cette thèse a été menée. En effet, cette étude qui peut être considérée comme une première phase d'un travail plus important visant à fournir des outils robustes aux opérationnels et nécessitant donc plus de temps pour sa réalisation, a pour principal objectif d'identifier puis mieux comprendre les principaux mécanismes entraînant la réussite ou l'échec d'un brûlage dirigé.

Cette étude s'est déroulée au sein du projet « Feux » de l'université de Corse qui développe depuis 2005 une approche semi-physique afin de modéliser le comportement d'un incendie. Cette approche simplifiée a été choisie car elle doit permettre aux différents modèles développés d'être intégrés dans des simulateurs et utilisés ensuite comme un outil de prévision à des fins de prévention et/ou de lutte.

Première partie de la thèse

La première partie de la thèse porte sur le test d'un critère semi-physique proposé par l'équipe de chercheurs du projet « Feux » en 2014 qui détermine la teneur en eau d'extinction du feu à plat et sans vent. Ce critère est obtenu grâce à une formule analytique calculée à partir des propriétés du combustible et de la température ambiante. Deux séries de tests sont réalisés : une utilisant des données issues d'expériences menées au laboratoire UMR 6134 SPE de l'université de Corse, un modèle empirique proposé par Wilson [19] et des données de la

littérature [181] ; la deuxième série est réalisée en utilisant des résultats numériques obtenus avec un modèle physique complet, FireStar2D.

Tests expérimentaux à l'échelle de laboratoire

48 tests expérimentaux utilisant de la frisure de bois ont été conduits au sein du laboratoire UMR 6134 SPE de l'université de Corse. Le but principal de ces travaux expérimentaux était d'étudier l'influence de la teneur en eau sur le comportement du feu, déterminer la teneur en eau d'extinction et finalement étudier l'influence de la charge surfacique sur la teneur en eau d'extinction. Pour cela, trois charges surfaciques sont prises en compte : 0,15 ; 0,2 et 0,4 kg m^{-2}. Ces résultats expérimentaux ont confirmé qu'il y a une diminution du ROS, de la puissance du feu, de la vitesse de dégradation du combustible et également du flux reçu par la végétation devant le front de flammes lorsque la teneur en eau augmente.

D'autre part, cela a permis de montrer que les teneurs en eau d'extinction obtenues expérimentalement, à l'aide de la loi empirique de Wilson et avec FireStar2D sont très proches de celles prédites par le modèle semi-physique. Ainsi, pour le cas d'une charge surfacique de 0,2 kg m^{-2}, une valeur limite de teneur en eau du combustible permettant la propagation est déterminée expérimentalement dans une zone de 58 à 65 %. FireStar2D donne une valeur d'extinction de 50 %, le modèle analytique de 54 % et le modèle empirique de 57 %.

De plus, les tests expérimentaux, le modèle semi-physique et la loi empirique de Wilson ont montré une augmentation de la teneur en eau d'extinction avec la charge surfacique. Finalement, ce critère semi-physique de non-propagation est confronté à des données tirées de la littérature lors d'expériences réalisées par Wilson [19] et par Weise [181] pour des combustibles homogènes (aiguilles de pins et frisure de bois) mais aussi hétérogène (chaparral). Pour ce dernier, un modèle de combustible « équivalent » est donc utilisé.

Tests numériques à l'échelle du terrain

La deuxième série de tests est effectuée avec un modèle physique complet et utilisent des résultats numériques d'un code appelé Firestar2D et basé sur une modélisation multiphasique. Le but premier de ces tests numériques est de tester le modèle semi-physique à l'échelle de terrain en utilisant deux types de végétations : homogène (herbe) et hétérogène (maquis). Ensuite, un autre objectif est d'étudier l'influence de la charge surfacique et de la LAI sur la teneur en eau d'extinction puis finalement déterminer un seuil de vent pour déterminer un domaine d'utilisation du critère semi-physique proposé par Balbi *et al*. [141].

Les teneurs en eau d'extinction obtenues numériquement et avec le critère semi-physique pour les deux types de végétation sont très proches et en accord avec les résultats de la littérature. Le modèle analytique prédit une valeur d'extinction de 24 %, et FireStar2D de 21%. D'autres simulations réalisées avec des charges variant entre de 0,3 à 2 kg m^{-2} sont réalisées afin de comparer les résultats donnés avec FireStar2D et par la formule analytique. Les résultats des deux modèles sont très proches et montrent la même tendance : il y a une augmentation de la valeur du seuil d'extinction lorsque la charge augmente et ce, jusqu'à une valeur critique où la charge n'a plus aucune influence sur la valeur seuil d'extinction. Il faut noter que la formule empirique surestime les résultats dans le cas de l'herbe. Ceci peut s'expliquer car elle a été obtenue par une étude statistique sur des tests de laboratoire en utilisant seulement deux combustibles et ayant des propriétés physiques différentes de celles de l'herbe australienne. Une autre étude numérique est réalisée pour évaluer l'influence de la LAI sur la teneur en eau d'extinction. En effet, les résultats numériques obtenus avec le code physique et l'approche semi-physique montrent que la teneur en eau d'extinction reste constante pour un LAI constant, c'est-à-dire pour un produit $\beta.e$ constant mais pour une masse volumique apparente variable.

Pour finir, une étude numérique est réalisée avec de l'herbe afin de déterminer la vitesse maximale du vent au-dessus de laquelle le critère semi-physique ne doit plus être utilisé. Les tests numériques ont ainsi montré que ce critère peut être employé jusqu'à une vitesse de 0,5 m s^{-1}. Cette étude peut intéresser les personnes en charge de la lutte contre les incendies, surtout lors de l'emploi des techniques de brûlages dirigés à contrevent afin de déterminer les conditions optimales de mise à feu. En effet, elle est censée déterminer la réussite ou l'échec de ce type de feux grâce aux propriétés du combustible et à la température ambiante. Ces résultats ont été acceptés pour publication dans le journal « Fire Safety Journal » en 2020 sous le titre de : « Fuel moisture content threshold leading to fire extinction under marginal conditions ». Ils ont aussi été présentés dans deux conférences internationales en 2019 respectivement à « 6th Fuels and Fire behavior » en Mai à Marseille en France et à « 8th International Fire Ecology and Management Congress » en Novembre à Tucson aux USA.

Deuxième partie de thèse

Les brûlages dirigés sont des feux marginaux réalisés lorsque les vents sont faibles, modérés mais parfois aussi lorsque les vents sont forts. C'est pour cette raison que la deuxième partie de la thèse est dédiée à la détermination des conditions optimales pour la réussite des feux marginaux sous des vents non nuls. Pour cela, une étude numérique réalisée avec FireStar2D pour une végétation homogène (l'herbe) permet de déterminer une relation empirique de la teneur en eau d'extinction en fonction de la vitesse du vent et de la charge surfacique du combustible. Les simulations sont conduites pour une large gamme de vitesses de vent et des charges surfaciques qui varient respectivement de 0 à 10 m s^{-1} et de 0,1 à 0,7 kg m^{-2}. Le modèle empirique proposé utilise une teneur en eau de départ pour le cas du vent nul évaluée à l'aide du critère semi-physique de Balbi *et al.*[141]. Les influences de la charge surfacique et du vent sur la teneur en eau d'extinction sont aussi étudiées. Les résultats montrent que m_x augmente avec la charge surfacique jusqu'à une valeur critique de charge où m_x devient

indépendante de cette valeur. L'hypothèse avancée pour expliquer cette tendance est que cela est dû à la nature du milieu de propagation qui est considéré soit comme mince soit comme épais thermiquement. De même, m_x augmente avec le vent jusqu'à une valeur limite où m_x devient moins dépendant de ce vent. Ceci est expliqué par le fait que la force de flottabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en eau du combustible et l'intensité du vent.

L'action du vent est très importante sur la flamme jusqu'à une valeur limite de son intensité au-dessus de laquelle les caractéristiques du front de flammes sont moins sensibles aux variations de ce vent. Pour finir, l'influence combinée du vent et de la teneur en eau sur le comportement du feu et surtout sur les caractéristiques de la flamme (temps de résidence, profondeur de la flamme) est étudiée. Ainsi, deux comportements différents sont identifiés : pour les vents faibles, le temps de résidence et l'épaisseur de la flamme diminuent avec la teneur en eau du combustible. Pour les vents modérés et forts, le temps de résidence et l'épaisseur de la flamme diminuent également avec cette teneur en eau mais seulement jusqu'à une valeur seuil de 40 %. Au-dessus de ce seuil, le temps de résidence augmente pour des valeurs de *m* plus importantes et la profondeur de la flamme tend vers une constante. Cette étude fut l'objet de la rédaction d'un « abstract » qui est accepté pour la conférence internationale intitulé « Numerical Wildfire 2020 » qui devait se dérouler en 2020 en Corse à Cargèse. Malheureusement, la conférence est rapportée à Mars 2021 à cause de la pandémie actuelle qui sévit.

Perspectives

Cette étude peut être vu comme un travail préliminaire d'un projet plus important mené au sein du groupe modélisation du projet « Feux » de l'UMR SPE 6134 de l'Université de Corse et devant aboutir à une meilleure compréhension des effets de la teneur en eau du combustible sur le comportement d'un feu de forêt. Pour cela, plusieurs configurations ont été sélectionnées à partir de travaux antérieurs présents dans la littérature à l'aide de plusieurs approches faisant

appel à des expériences, des lois empiriques, des modèles physiques simplifié et un code complet 2D. Les résultats obtenus sont prometteurs et permettent d'envisager le passage aux étapes suivantes.

La prochaine étape pourrait être de prendre en compte le caractère 3D du front de feu [121]. Cette étude sera donc faite pour les mêmes configurations que celles décrites dans ce document mais à l'aide de FireStar3D, la version 3D du modèle complet utilisé pour la première étape. Des résultats préliminaires en 3D montrent des valeurs de la teneur en eau d'extinction beaucoup plus élevée que celles obtenue en 2D. Ce qui semble être dû à la nature non homogène du front de flammes [266].

Une étape importante sera également d'étudier l'influence de la pente sur les seuils d'extinction car tous les brûlages dirigés ne se font pas à plat.

De plus, ce travail se base uniquement sur la vitesse moyenne du vent à 10 m d'altitude, sans prendre en considération l'instabilité de l'écoulement du vent en conditions réelles, surtout à proximité des tourbillons. Ceci permet de fixer une autre perspective et donc une autre étape qui consisterait à étudier l'influence de l'instabilité de l'écoulement d'un vent réel sur la vitesse de propagation et donc sur le comportement du feu.

Pour conclure, une série des tests expérimentaux à l'échelle du terrain avec des conditions de propagation marginales pourrait être menée afin de confronter les résultats expérimentaux aux résultats théoriques obtenus et fournir aux opérationnels des données susceptibles d'être utilisées facilement par leurs soins.

Bibliographie

1. Colin, P.-Y.; Jappiot, M.; Mariel, A.; Cabaret, C.; Brocchiero, F.V.S. *Protection des forêts contre l'incendie : fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen*; CEMAGREF, Ed.; FAO, 2001; ISBN 9789252046783.
2. di Castri, F.; Mooney, H.A. *Mediterranean Type Ecosystems : Origin and Structure*; Springer Berlin Heidelberg, 1973; ISBN 9783642655203.
3. Salis, M. Fire Behaviour Simulation in Mediterranean Maquis using FARSITE (Fire Area Simulator), 2008.
4. Blumler, M. Three Conflated Definitions of Mediterranean Climates. *Middle States Geogr.* **2005**, *38*, 52–60.
5. Cardoso Castro Rego, F.M.; Moreno Rodriguez, J.M.; Vallejo Calzada, V.R.; Xanthopoulos, G. *Forest Fires - Sparking firesmart policies in the EU*; Nicolas Faivre, Ed.; Research &.; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2018;
6. San-Miguel-Ayanz, J.; Moreno, J.M.; Camia, A. Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *For. Ecol. Manage.* **2013**, *294*, 11–22, doi:10.1016/j.foreco.2012.10.050.
7. Liu, J.C.; Mickley, L.J.; Sulprizio, M.P.; Dominici, F.; Yue, X.; Ebisu, K.; Anderson, G.B.; Khan, R.F.A.; Bravo, M.A.; Bell, M.L. Particulate Air Pollution from Wildfires in the Western US under Climate Change. *Clim. Change* **2016**, *138*, 655–666, doi:10.1007/s10584-016-1762-6.
8. San-Miguel-Ayanz, J.; Moreno, J.M.; Camia, A. Analysis of large fires in European

Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *For. Ecol. Manage.* **2013**, *294*, 11–22, doi:10.1016/j.foreco.2012.10.050.

9. Benson, R.P.; Roads, J.O.; Weise, D.R. Chapter 2 Climatic and Weather Factors Affecting Fire Occurrence and Behavior. In *Developments in Environmental Science*; Bytnerowicz, A., Arbaugh, M.J., Riebau, A.R., Andersen, C., Eds.; Elsevier, 2008; Vol. 8, pp. 37–59 ISBN 9780080556093.
10. Sommers, W.T.; Coloff, S.G.; Conard, S.G. *Synthesis of Knowledge: Fire History and Climate Change*; 2011;
11. FAO *Fire management - global assessment 2006*; Rome, 2007;
12. Leone, V.; Lovreglio, R.; Pilar Martìn, M.; Martinez, J.; Vilar, L. Human Factors of Fire Occurrence in the Mediterranean. In *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*; Chuvieco, E., Ed.; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009; pp. 1–257 ISBN 9783642017537.
13. Ganteaume, A.; Jappiot, M. What causes large fires in Southern France. *For. Ecol. Manage.* **2013**, *294*, 76–85, doi:10.1016/j.foreco.2012.06.055.
14. Prométhée : Accueil Available online: https://www.promethee.com/ (accessed on May 10, 2020).
15. Le brûlage dirigé : une technique novatrice d'aménagement du territoire ! Available online: http://www.sdis2b.fr/Le-brulage-dirige-une-technique-novatrice-d-amenagement-du-territoire-_a425.html (accessed on May 10, 2020).
16. Fernandes, P.M. Fire-smart management of forest landscapes in the Mediterranean basin under global change. *Landsc. Urban Plan.* **2013**, *110*, 175–182, doi:10.1016/j.landurbplan.2012.10.014.
17. Weise, D.R.; Zhou, X.; Mahalingam, S.; Chong, J. *Marginal fire spread in live fuel beds - horizontal fuels*; Fort Collins, CO: Forest Service Research Data Archive. Updated 23

March 2016, 2015;

18. Morvan, D. Numerical study of the effect of fuel moisture content (FMC) upon the propagation of a surface fire on a flat terrain. *Fire Saf. J.* **2013**, *58*, 121–131, doi:10.1016/j.firesaf.2013.01.010.
19. Wilson, R.A. Observations of Extinction and Marginal Burning States in Free Burning Porous Fuel Beds. *Combust. Sci. Technol.* **1985**, *44*, 179–193, doi:10.1080/00102208508960302.
20. Projet Feux | Università di Corsica Pasquale Paoli | Université de Corse Pasquale Paoli Available online: https://feuxdeforet.universita.corsica/ (accessed on May 10, 2020).
21. Cowling, R.M.; Rundel, P.W.; Lamont, B.B.; Arroyo, M.K.; Arianoutsou, M. Plant diversity in mediterranean-climate regions. *Trends Ecol. Evol.* **1996**, *11*, 362–366, doi:10.1016/0169-5347(96)10044-6.
22. Watson, R.T.; Heywood, V.H.; Baste, I.; Dias, B.; Gámez, R.; Janetos, T.; Reid, W.; Ruark, G. *Global Biodiversity Assessment: Summary for Policy Makers*; Cambridge University Press, 1995; ISBN 9780521564809.
23. RN 8 – Incendies de forêt » Mémento du maire et des élus locaux Available online: http://www.mementodumaire.net/les-risques-naturels/rn-8-incendies-de-forets/ (accessed on May 10, 2020).
24. Sullivan, A.L. Inside the Inferno : Fundamental Processes of Wildland Fire Behaviour Part 1 : Combustion Chemistry and Heat Release. *Fire Sci. Manag.* **2017**, *3*, 132–149, doi:10.1007/s40725-017-0057-0.
25. Rossi, J.-L.; Morvan, D.; Simeoni, A.; Marcelli, T.; Chatelon, F.-J. Fuelbreaks: a part of wildfire prevention. In *Global Assessment Report 2019*; United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), Ed.; Geneva, 2019; p. 25.
26. Anderson, H.E.; Rothermel, R.C. Influence of moisture and wind upon the characteristics

of free-burning fires. *Symp. Combust.* **1965**, *10*, 1009–1019, doi:10.1016/S0082-0784(65)80243-0.

27. Sullivan, A.L. Inside the Inferno : Fundamental Processes of Wildland Fire Behaviour Part 2 : Heat Transfer and Interactions. *Fire Sci. Manag.* **2017**, *3*, 150–171, doi:10.1007/s40725-017-0058-z.
28. Dupuy, J.-L. Les apports possibles de la physique du feu à la conception et à l'entretien des coupures de combustible. *Forêt méditerranéenne* **2000**, *XXI*, 497–510.
29. *Wildfire Magazine*. Missoula, MT, 59801 USA April 2019, pp. 14–17.
30. European Commission *JRC Tecnical Report Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2018*; 2018; ISBN 9789276112334.
31. Wotton, B.M.; Martell, D.L.; Logan, K.A. Climate change and people-caused fire occurrence in Ontario. *Clim. Change* **2003**, *60*, 275–295, doi:10.1023/A:1026075919710.
32. Oliveira, S.; Oehler, F.; San-Miguel-Ayanz, J.; Camia, A.; Pereira, J.M.C. Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest. *For. Ecol. Manage.* **2012**, *275*, 117–129, doi:10.1016/j.foreco.2012.03.003.
33. Vázquez, A.; Moreno, J.M. Patterns of lightning-, and people-caused fires in Peninsular Spain. *Int. J. Wildl. Fire* **1998**, *8*, 103–115, doi:10.1071/WF9980103.
34. Kristensen, P.; Iglesias, A.; Sauri, D.; Agency, E.E. *Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe, An overview of the last decade*; 2010;
35. Catry, F.X.; Rego, F.C.; Sande Silva, J.; Moreira, F. *Fire starts and huma activities*; Joensuu, 2010;
36. Migliorini, M.; Hagen, J.S.; Mihaljević, J.; Mysiak, J.; Rossi, J.-L.; Siegmund, A.; Meliksetian, K.; Guha Sapir, D. Data interoperability for disaster risk reduction in

Europe. *Disaster Prev. Manag. An Int. J.* **2019**, *28*, 796–808, doi:10.1108/DPM-09-2019-0291.

37. Modugno, S.; Balzter, H.; Cole, B.; Borrelli, P. Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe. *J. Environ. Manage.* **2016**, *172*, 112–126, doi:10.1016/j.jenvman.2016.02.013.

38. Attiwill, P.; Binkley, D. Exploring the mega-fire reality: A "Forest Ecology and Management" conference. *For. Ecol. Manage.* **2013**, *294*, 1–3, doi:10.1016/j.foreco.2012.12.025.

39. Tedim, F.; Leone, V.; Amraoui, M.; Bouillon, C.; Coughlan, M.; Delogu, G.; Fernandes, P.; Ferreira, C.; McCaffrey, S.; McGee, T.; et al. Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts. *Fire* **2018**, *1*, 9, doi:10.3390/fire1010009.

40. *Plans de prévention des risques naturels (PPR) - Risques d'incendies de forêt*; La documentation Française: Paris, 2002; ISBN 2-11-005035-7.

41. Dimitrakopoulos, A.P.; Mitsopoulos, I.D.; Gatoulas, K. Assessing ignition probability and moisture of extinction in a Mediterranean grass fuel. *Int. J. Wildl. Fire* **2010**, *19*, 29–34, doi:10.1071/WF08124.

42. Plucinski, M.P.; Anderson, W.R. Laboratory determination of factors influencing successful point ignition in the litter layer of shrubland vegetation. *Int. J. Wildl. Fire* **2008**, *17*, 628, doi:10.1071/wf07046.

43. Shotorban, B.; Yashwanth, B.L.; Mahalingam, S.; Haring, D.J. An investigation of pyrolysis and ignition of moist leaf-like fuel subject to convective heating. *Combust. Flame* **2018**, *190*, 25–35, doi:10.1016/j.combustflame.2017.11.008.

44. Argañaraz, J.P.; Landi, M.A.; Scavuzzo, C.M.; Bellis, L.M. Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system. *PLoS One* **2018**, *13*, 1–19, doi:10.1371/journal.pone.0204889.

45. Dennison, P.E.; Moritz, M.A. Critical live fuel moisture in chaparral ecosystems: a threshold for fire activity and its relationship to antecedent precipitation. *Int. J. Wildl. Fire* **2009**, *18*, 1021, doi:10.1071/WF08055.

46. Chuvieco, E.; González, I.; Verdú, F.; Aguado, I.; Yebra, M. Prediction of fire occurrence from live fuel moisture content measurements in a Mediterranean ecosystem. *Int. J. Wildl. Fire* **2009**, *18*, 430, doi:10.1071/WF08020.

47. Morvan, D.; Dupuy, J.L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation. *Combust. Flame* **2004**, *138*, 199–210, doi:10.1016/j.combustflame.2004.05.001.

48. Flannigan, M.; Cantin, A.S.; De Groot, W.J.; Wotton, M.; Newbery, A.; Gowman, L.M. Global wildland fire season severity in the 21st century. *For. Ecol. Manage.* **2013**, *294*, 54–61, doi:10.1016/j.foreco.2012.10.022.

49. Hargrove, W.; Gardner, R.H.; Turner, M.; Romme, W.H.; Despain, D.G. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecol. Modell.* **2000**, *135*, 243–263, doi:10.1016/S0304-3800(00)00368-9.

50. McCaw, W.L. Managing forest fuels using prescribed fire - A perspective from southern Australia. *For. Ecol. Manage.* **2013**, *294*, 217–224, doi:10.1016/j.foreco.2012.09.012.

51. Waldrop, T.A.; Goodrick, S.L. *Introduction to Prescribed Fire in Southern Ecosystems Southern Research Station*; Asheville, NC 28804, 2018;

52. Brown, A.A.; Davis, K.P. *Forest fire: control and use*; Vaux, H.J., Ed.; 2nd ed.; McGraw-Hill Book Company: New-York, USA, 1973; ISBN 0-07-008205-7.

53. Cawson, J.G.; Duff, T.J. Forest fuel bed ignitability under marginal fire weather conditions in Eucalyptus forests. *Int. J. Wildl. Fire* **2019**, 198–204, doi:10.1071/WF18070.

54. Agee, J.K.; Skinner, C.N. Basic principles of forest fuel reduction treatments. *For. Ecol.*

Manage. **2005**, *211*, 83–96, doi:10.1016/j.foreco.2005.01.034.

55. Rachmawati, R.; Ozlen, M.; Reinke, K.J.; Hearne, J.W. An optimisation approach for fuel treatment planning to break the connectivity of high-risk regions. *For. Ecol. Manage.* **2016**, *368*, 94–104, doi:10.1016/j.foreco.2016.03.014.

56. Moreira, F.; Viedma, O.; Arianoutsou, M.; Curt, T.; Koutsias, N.; Rigolot, E.; Barbati, A.; Corona, P.; Vaz, P.; Xanthopoulos, G.; et al. Landscape - wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. *J. Environ. Manage.* **2011**, *92*, 2389–2402, doi:10.1016/j.jenvman.2011.06.028.

57. Swetnam, T.W. Fire history and climate change in giant sequoia groves. *Science (80-.).* **1993**, *262*, 885–889, doi:10.1126/science.262.5135.885.

58. Flannigan, M.D.; Krawchuk, M.A.; De Groot, W.J.; Wotton, B.M.; Gowman, L.M. Implications of changing climate for global wildland fire. *Int. J. Wildl. Fire* **2009**, *18*, 483–507, doi:10.1071/WF08187.

59. Šturm, T.; Fernandes, P.M.; Šumrada, R. The Canadian fire weather index system and wildfire activity in the Karst forest management area, Slovenia. *Eur. J. For. Res.* **2012**, *131*, 829–834, doi:10.1007/s10342-011-0556-7.

60. Jolly, W.M.; Cochrane, M.A.; Freeborn, P.H.; Holden, Z.A.; Brown, T.J.; Williamson, G.J.; Bowman, D.M.J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nat. Commun.* **2015**, *6*, 11, doi:10.1038/ncomms8537.

61. Kovats, R.S.; Valentini, R.; Bouwer, L.M.; Georgopoulou, E.; Jacob, D.; Martin, E.; Rounsevell, M.; Soussana, J.F. *WG2 Chapter 23*; 2015;

62. European Environment Agency *European forest ecosystems: State and trends*; 2016;

63. Doerr, S.H.; Santín, C. Global trends in wildfire and its impacts: Perceptions versus realities in a changing world. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **2016**, *371*, doi:10.1098/rstb.2015.0345.

64. Bradstock, R.A. A biogeographic model of fire regimes in Australia: Current and future implications. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2010**, *19*, 145–158, doi:10.1111/j.1466-8238.2009.00512.x.

65. Dupuy, J. luc; Fargeon, H.; Martin-StPaul, N.; Pimont, F.; Ruffault, J.; Guijarro, M.; Hernando, C.; Madrigal, J.; Fernandes, P. Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review. *Ann. For. Sci.* **2020**, *77*, 24, doi:10.1007/s13595-020-00933-5.

66. Moatti, J.-P.; Thiébault, S. *The Mediterranean region under climate change*; IRD Éditions, 2016; ISBN 9782709922203.

67. Butler, B.W. Wildland firefighter safety zones: A review of past science and summary of future needs. *Int. J. Wildl. Fire* 2014, *23*, 295–308.

68. Raj, P.K. A review of the criteria for people exposure to radiant heat flux from fires. *J. Hazard. Mater.* **2008**, *159*, 61–71, doi:10.1016/j.jhazmat.2007.09.120.

69. Simeoni, A.; Rossi, J.-L. Firefighter Safety in High Intensity Fires. In Proceedings of the VII International Conference on Forest Fire Research; D.X. Viegas: Coimbra, Portugal, 2014; pp. 43–60.

70. Finlay, S.E.; Moffat, A.; Gazzard, R.; Baker, D.; Murray, V. Health impacts of wildfires. *PLoS Curr.* **2012**, *4*, e4f959951cce2c, doi:10.1371/4f959951cce2c.

71. European Science & Technology Advisory Group *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;

72. Johnston, F.H.; Henderson, S.B.; Chen, Y.; Randerson, J.T.; Marlier, M.; DeFries, R.S.; Kinney, P.; Bowman, D.M.J.S.; Brauer, M. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environ. Health Perspect.* **2012**, *120*, 695–701, doi:10.1289/ehp.1104422.

73. Osmont, A.; Chetehouna, K.; Chaumeix, N.; DeYonker, N.J.; Catoire, L. Thermodynamic data of known volatile organic compounds (VOCs) in Rosmarinus officinalis: Implications for forest fire modeling. *Comput. Theor. Chem.* **2015**, *1073*, 27–33, doi:10.1016/j.comptc.2015.09.008.

74. Miranda, A.I.; Martins, V.; Casco, P.; Amorim, J.H.; Valente, J.; Borrego, C.; Ferreira, A.J.; Cordeiro, C.R.; Viegas, D.X.; Ottmar, R. Wildland smoke exposure values and exhaled breath indicators in firefighters. In Proceedings of the Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues; 2012; Vol. 75, pp. 831–843.

75. Martins, V.; Miranda, A.I.; Carvalho, A.; Schaap, M.; Borrego, C.; Sá, E. Impact of forest fires on particulate matter and ozone levels during the 2003, 2004 and 2005 fire seasons in portugal. *Sci. Total Environ.* **2012**, *414*, 53–62, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.10.007.

76. Wotawa, G.; Trainer, M. The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States. *Science (80-.).* **2000**, *288*, 324–328, doi:10.1126/science.288.5464.324.

77. Ager, A.A.; Lasko, R.; Myroniuk, V.; Zibtsev, S.; Day, M.A.; Usenia, U.; Bogomolov, V.; Kovalets, I.; Evers, C.R. The wildfire problem in areas contaminated by the Chernobyl disaster. *Sci. Total Environ.* **2019**, *696*, 133954, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133954.

78. Tchernobyl : Un important feu de forêt ravage la zone d'exclusion, la situation s'améliore selon les autorités Available online: https://www.20minutes.fr/monde/2760399-20200414-tchernobyl-important-feu-foret-ravage-zone-exclusion-situation-ameliore-selon-autorites (accessed on May 10, 2020).

79. Mazzoleni, L.R.; Zielinska, B.; Moosmüller, H. Emissions of levoglucosan, methoxy phenols, and organic acids from prescribed burns, laboratory combustion of wildland

fuels, and residential wood combustion. *Environ. Sci. Technol.* **2007**, *41*, 2115–2122, doi:10.1021/es061702c.

80. JRC in brief | EU Science Hub Available online: https://ec.europa.eu/jrc/en/about/jrc-in-brief (accessed on May 10, 2020).

81. EFFIS - Welcome to EFFIS Available online: https://effis.jrc.ec.europa.eu/ (accessed on May 10, 2020).

82. Liousse, C.; San-Miguel-Ayanz, J.; Camia, A.; Guillaume, B. A new methodology for the near-real time estimation of smoke plume emissions from forest fires in the European Forest Fire Information System. In Proceedings of the Proceeding 8th International Workshop EARSeL, Special Interest Group on Forest Fires; Stresa, 2011.

83. Hodzic, A.; Madronich, S.; Bohn, B.; Massie, S.; Menut, L.; Wiedinmyer, C. Wildfire particulate matter in Europe during summer 2003: meso-scale modeling of smoke emissions, transport and radiative effects. *Atmos. Chem. Phys.* **2007**, *7*, 4043–4064, doi:10.5194/acp-7-4043-2007.

84. Youssouf, H.; Liousse, C.; Roblou, L.; Assamoi, E.-M.; Salonen, R.; Maesano, C.; Banerjee, S.; Annesi-Maesano, I. Non-Accidental Health Impacts of Wildfire Smoke. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2014**, *11*, 11772–11804, doi:10.3390/ijerph111111772.

85. Cascio, W.E. Wildland fire smoke and human health. *Sci. Total Environ.* **2018**, *624*, 586–595, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.086.

86. Kochi, I.; Donovan, G.H.; Champ, P.A.; Loomis, J.B. The economic cost of adverse health effects from wildfire-smoke exposure: a review. *Int. J. Wildl. Fire* **2010**, *19*, 803, doi:10.1071/WF09077.

87. Meyer, V.; Becker, N.; Markantonis, V.; Schwarze, R.; van den Bergh, J.C.J.M.; Bouwer, L.M.; Bubeck, P.; Ciavola, P.; Genovese, E.; Green, C.; et al. Review article:

Assessing the costs of natural hazards – state of the art and knowledge gaps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2013**, *13*, 1351–1373, doi:10.5194/nhess-13-1351-2013.

88. Thomas, D.; Butry, D.; Gilbert, S.; Webb, D.; Fung, J. *The Costs and Losses of Wildfires: A Literature Survey (NIST Special Publication 1215)*; 2017;
89. Whelton, A. *Implications of the California Wildfires for Health, Communities, and Preparedness*; National Academies Press, 2019;
90. Yao, J.; Brauer, M.; Henderson, S.B. Evaluation of a wildfire smoke forecasting system as a tool for public health protection. *Environ. Health Perspect.* **2013**, *121*, 1142–1147, doi:10.1289/ehp.1306768.
91. Fernandes, P. Forest Context and Policies in Portugal. **2014**, *19*, doi:10.1007/978-3-319-08455-8.
92. Wildland Fire Operations Research Group Fuelbreak effectiveness: state of the knowledge. *FPInnovations: FERIC* **2007**, 1–10.
93. Francetić, N. *Vatrogasni vjesnik*. Zagreb January 2019, pp. 31–36.
94. Altshuler, A.; Amaratunga, D.; Arefyeva, E.; Dolce, M.; Sjastad Hagen, J.; Komac, B.; Migliorini, M.; Mihaljevic, J.; Mysiak, J.; Fra Paleo, U.; et al. *Socioeconomic and Data challenges Disaster Risk Reduction in Europe*; Brussels, Belgium, 2019;
95. Filippi, J.-B.; Bosseur, F.; Mari, C.; Lac, C. Simulation of a Large Wildfire in a Coupled Fire-Atmosphere Model. *Atmosphere (Basel).* **2018**, *9*, 218, doi:10.3390/atmos9060218.
96. Fujioka, F.M.; Gill, A.M.; Viegas, D.X.; Wotton, B.M. Chapter 21 Fire Danger and Fire Behavior Modeling Systems in Australia, Europe, and North America. *Dev. Environ. Sci.* **2008**, *8*, 471–497, doi:10.1016/S1474-8177(08)00021-1.
97. Dimitrakopoulos, A.P.; Bemmerzouk, A.M.; Mitsopoulos, I.D. Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorol. Appl.* **2011**, doi:10.1002/met.214.

98. Stocks, B.J.; Lynham, T.J.; Lawson, B.D.; Alexander, M.E.; Wagner, C.E. Van; McAlpine, R.S.; Dubé, D.E. The Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview. *For. Chron.* **1989**, doi:10.5558/tfc65450-6.

99. Wotton, B.M. Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications. *Environ. Ecol. Stat.* **2009**, *16*, 107–131, doi:10.1007/s10651-007-0084-2.

100. CNRM-ALADIN - Centre National de Recherches Météorologiques Available online: https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article125 (accessed on Apr 29, 2020).

101. INCA-CE Available online: http://www.inca-ce.eu/CE-Portal/ (accessed on Apr 29, 2020).

102. Environment Agency Meteorological Data for the Bilje Meteorological station. **2020**.

103. Byram, G.M. Combustion of forest fuels. In: Davis, K.P., ed. Forest fire: control and use. In *New York McGraw Hill*; 1959; pp. 61–89.

104. Rossi, J.L.; Chatelon, F.J.; Marcelli, T. Fire Intensity. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*; Manzello, S.L., Ed.; Springer International Publishing: Cham, 2018; pp. 1–6 ISBN 978-3-319-51727-8.

105. Dennis, F.C. Fuelbreak Guidelines for Forested Subdivisions & Communities. 1–8.

106. Agee, J.K.; Bahro, B.; Finney, M. a; Omi, P.N.; Sapsis, D.B.; Skinner, C.N.; van Wagtendonk, J.W.; Weatherspoon, C.P. The use of shaded fuelbreaks in landscape fire management. *For. Ecol. Manage.* **2000**, *127*, 55–66.

107. Bisgambiglia, P.-A.; Rossi, J.-L.; Franceschini, R.; Chatelon, F.-J.; Bisgambiglia, P.A.; Rossi, L.; Marcelli, T. DIMZAL: A Software Tool to Compute Acceptable Safety Distance. *Open J. For.* **2017**, *07*, 11–33, doi:10.4236/ojf.2017.71002.

108. Rossi, J.L.; Simeoni, A.; Moretti, B.; Leroy-Cancellieri, V. An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires. *Fire Saf.*

J. **2011**, *46*, 520–527, doi:10.1016/j.firesaf.2011.07.007.

109. Cohen, J.D. Preventing disaster: home ignitability in the wildland-urban interface. *J. For.* **2000**, *98*, 15–21.

110. Arno, S.F.; Brown, J.K. Managing Fire in Our Forests--Time for a New Initiative. *J. For.* **1989**, *87*, 44–46, doi:10.1093/jof/87.12.44.

111. FAO *Fire Management: Voluntary Guidelines - Principles ans strategic actions*; Rome, 2006; Vol. 17;.

112. Dunn, C.J.; Calkin, D.E.; Thompson, M.P. Towards enhanced risk management: planning, decision making and monitoring of US wildfire response. *Int. J. Wildl. Fire* **2017**, *26*, 551, doi:10.1071/WF17089.

113. Rossi, J.-L.; Arca, B.; Salis, M.; Balbi, J.-H.; Filippi, J.B.; Innocenti, E.; Marcelli, T.; Santoni, P.-A. *Modelling the spread of wildland fire under Mediterranean conditions*; 2009;

114. Sullivan, A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *Int. J. Wildl. Fire* **2009**, *18*, 349–368, doi:10.1071/WF06144.

115. Sullivan, A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *Int. J. Wildl. Fire* **2009**, *18*, 369–386, doi:10.1071/WF06144.

116. Sullivan, A.L. A review of wildland fire spread modelling , 3 : Mathematical analogues and simulation models. *Int. J. Wildl. Fire* **2009**, *18*, 387–403, doi:10.1071/WF06144.

117. Weber, R.O. Modelling fire spread through fuel beds. *Prog. Energy Combust. Sci.* 1991, *17*, 67–82.

118. McArthur, A.G. *Weather and grassland fire behaviour*; Forestry and Timber Bureau: Canberra, 1966;

119. Rothermel, R.C. *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;

120. Andrews, P.L. *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System - BURN Subsystem, Part 1*; Ogden, UT 84401, 1986;

121. Morvan, D.; Accary, G.; Meradji, S.; Frangieh, N.; Bessonov, O. A 3D physical model to study the behavior of vegetation fires at laboratory scale. *Fire Saf. J.* **2018**, *101*, 39–52, doi:10.1016/J.FIRESAF.2018.08.011.

122. Mell, W.; Jenkins, M.A.; Gould, J.; Cheney, P. A physics-based approach to modelling grassland fires. *Int. J. Wildl. Fire* **2007**, *16*, 1–22, doi:10.1071/WF06002.

123. Linn, R.; Reisner, J.; Colman, J.J.; Winterkamp, J. Studying wildfire behavior using FIRETEC. *Int. J. Wildl. Fire* **2002**, *11*, 233, doi:10.1071/wf02007.

124. Frangieh, N.; Morvan, D.; Meradji, S.; Accary, G.; Bessonov, O. Numerical simulation of grassland fires behavior using an implicit physical multiphase model. *Fire Saf. J.* **2018**, *102*, 37–47, doi:10.1016/j.firesaf.2018.06.004.

125. Grishin, A.M. *Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods of Fighting Them*; Albini, F.A., Ed.; Publishing House of the Tomsk University: Tomsk, Russia, 1997;

126. Morvan, D.; Frangieh, N. Wildland fires behaviour: Wind effect versus Byram's convective number and consequences upon the regime of propagation. *Int. J. Wildl. Fire* **2018**, *27*, 636–641, doi:10.1071/WF18014.

127. Balbi, J.-H.; Morandini, F.; Silvani, X.; Filippi, J.B.; Rinieri, F. A physical model for wildland fires. *Combust. Flame* **2009**, *156*, 2217–2230, doi:10.1016/j.combustflame.2009.07.010.

128. Chatelon, F.J.; Balbi, J.H.; Morvan, D.; Rossi, J.L.; Marcelli, T. A convective model for laboratory fires with well-ordered vertically-oriented fuel beds. *Fire Saf. J.* **2017**, *90*, doi:10.1016/j.firesaf.2017.04.022.

129. Balbi, J.-H.; Rossi, J.-L.; Marcelli, T.; Chatelon, F.-J. Physical Modeling of Surface Fire Under Nonparallel Wind and Slope Conditions. *Combust. Sci. Technol.* **2010**, *182*, 922–939.

130. Balbi, J.-H.; Chatelon, F.-J.; Rossi, J.-L.; Marcelli, T. How 10 years of physical assumptions led to the development of the Balbi model, from labor-atory scale to field scale. In Proceedings of the The Fire Continuum Conference – Preparing for the future of wildland fire; Missoula, MT, 2018.

131. Balbi, J.-H.; Rossi, J.-L.; Marcelli, T.; Santoni, P.-A. A 3D Physical Real-Time Model of Surface Fires Across Fuel Beds. *Combust. Sci. Technol.* **2007**, *179*, 2511–2537.

132. Balbi, J.H.; Chatelon, F.J.; Morvan, D.; Rossi, J.L.; Marcelli, T.; Morandini, F. A convective–radiative propagation model for wildland fires. *Int. J. Wildl. Fire* **2020**, *29*, 723–738, doi:10.1071/WF19103.

133. Rossi, J.-L.; Arca, B.; Salis, M.; Balbi, J.-H.; Filippi, J.B.; Innocenti, E.; Marcelli, T.; Santoni, P.-A. *Modelling the spread of wildland fire under Mediterranean conditions*; 2009;

134. Arca, B.; Bacciu, V.; Pellizzaro, G.; Salis, M.; Ventura, A.; Duce, P.; Spano, D.; Brundu, G. Fuel model mapping by IKONOS imagery to support spatially explicit fire simulators. In Proceedings of the 7th International Workshop of the EARSeL; Matera (Italy), 2009.

135. Cruz, M.G. *Guia fotográfico para identificação de combustíveis florestais*; Região Centro de Portugal, Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais, 2005;

136. Giakoumakis, M.; Gitas, I.; San-Miguel-Ayanz, J. Object-oriented classification modelling for fuel type mapping in the Mediterranean, using LANDSAT TM and IKONOS imagery- preliminary results. **2002**.

137. Sandberg, D. V.; Ottmar, R.D.; Cushon, G.H. Characterizing fuels in the 21st Century. *Int. J. Wildl. Fire* **2001**, doi:10.1071/wf01036.

138. Keane, R.E.; Burgan, R.; Van Wagtendonk, J. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *Int. J. Wildl. Fire* **2001**, doi:10.1071/wf01028.

139. Finney, M.A. *FARSITE: Fire Area Simulator - Model Development and Evaluation*; 1998;

140. Cohen, M.; Rigolot, E.; Valette, J.C. 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.

141. Balbi, J.-H.; Viegas, D.X.; Rossa, C.; Rossi, J.-L.; Chatelon, F.-J.; Cancellieri, D.; Simeoni, A.; Marcelli, T. Surface Fires: No Wind, No Slope, Marginal Burning. *J. Environ. Sci. Eng. A* **2014**, *3*, 73–86.

142. Weise, D.R.; Zhou, X.; Mahalingam, S.; Chong, J. *Marginal fire spread in live fuel beds - horizontal fuels*; Fort Collins, CO, 2015;

143. Marsden-Smedley, J.B.; Catchpole, W.R.; Pyrke, A. Fire modelling in Tasmanian buttongrass moorlands. IV * Sustaining versus non-sustaining fires. *Int. J. Wildl. Fire* **2001**, *10*, 255–262, doi:10.1071/WF01026.

144. Rossa, C.G. The effect of fuel moisture content on the spread rate of forest fires in the absence of wind or slope. *Int. J. Wildl. Fire* **2017**, *26*, 24–31, doi:10.1071/WF16049.

145. Catchpole, W.R.; Catchpole, E.A.; Tate, A.G.; Butler, B.; Rothermel, R.C. A model for the steady spread of fire through a homogeneous fuel bed. In Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research 2002, Wildland Fire Safety Summit; Luso, Coimbra, Portugal, 2002.

146. Wilson, R. *Reexamination of Rothermel Fire Spread Equations in No-Wind and No-Slope Conditions*; 1990;

147. Rothermel, R.C.; Anderson, H.E. *Fire spread characteristics determined in the laboratory*; USDA Forest Service, Research Paper INT-30, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, 1966;

148. Rossa, C.G.; Davim, D.A.; Viegas, D.X. Behaviour of slope and wind backing fires. *Int. J. Wildl. Fire* **2015**, *24*, 1085–1097, doi:10.1071/WF14215.

149. Nelson Jr., R.M. *Flame characteristics for fires in southern fuels*; USDA Forest Service, General Research Paper SE-205. Southeast Forest Experimental Station: Asheville, NC, USA, 1980;

150. Clark, K.L.; Heilman, W.E.; Skowronski, N.S.; Gallagher, M.R.; Mueller, E.; Hadden, R.M.; Simeoni, A. Fire behavior, fuel consumption, and turbulence and energy exchange during prescribed fires in pitch pine forests. *Atmosphere (Basel).* **2020**, *11*, 1–24, doi:10.3390/atmos11030242.

151. Indiana division of FISH & WILDLIFE *Prescribed Burning Habitat Management Fact Sheet*; 2005;

152. Marsden-Smedley, J.B.; Catchpole, W.R. Fire behaviour modelling in tasmanian buttongrass moorlands. I. Fuel characteristics. *Int. J. Wildl. Fire* **1995**, *5*, 203–214, doi:10.1071/WF9950203.

153. Pyne, S.J.; Andrews, P.L.; Laven, R.D. *Introduction to Wildland Fire : Fire Management in the United States*; Second Ed.; John Wiley and Sons Ltd: New York, United States, 1996; ISBN 9780471549130.

154. Green, L. *Fuelbreaks and other fuel modification for wildland fire control*; U.S. Department of Agricultre, 1977; ISBN Agriculture Handbook 499.

155. Kaiss, A.; Zekri, L.; Zekri, N.; Porterie, B.; Clerc, J.P.; Picard, C. Efficacité des coupures de combustible dans la prévention des feux de forêts. *Comptes Rendus Phys.* **2007**, *8*, 462–468, doi:10.1016/j.crhy.2007.02.002.

156. Dumez, R. Chapitre 1 - Histoire et techniques du feu agricole. In *Le feu, savoirs et pratiques en Cévennes*; Editions Quæ, 2010; pp. 31–58.

157. Dupuy, J.-L.; Maréchal, J. Slope effect on laboratory fire spread: contribution of radiation and convection to fuel bed preheating. *Int. J. Wildl. Fire* **2011**, *20*, 289, doi:10.1071/wf09076.

158. Viegas, D.X. On the existence of a steady state regime for slope and wind driven fires. *Int. J. Wildl. Fire* **2004**, *13*, 101, doi:10.1071/wf03008.

159. Kane, J.M. Fuel Moisture. *Encycl. Wildfires Wildland-Urban Interface Fires* 2020.

160. Cheney, P.; Sullivan, A. *Grassfires: Fuel, weather and fire behaviour*; 2nd Editio.; CSIRO PUBLISHING, 2008; ISBN 9780643093836.

161. Viney, N.R. A review of fine fuel moisture modelling. *Int. J. Wildl. Fire* **1991**, *1*, 215–234, doi:10.1071/WF9910215.

162. Luke, R.H. *Bushfires in Australia / R.H. Luke, A.G. McArthur | National Library of Australia*; Australian Government Publishing Service: Canberra, 1978; ISBN 0642039909.

163. Pompe, A.; Vines, R.G. THE INFLUENCE OF MOISTURE ON THE COMBUSTION OF LEAVES. *Aust. For.* **1966**, *30*, 231–241, doi:10.1080/00049158.1966.10675417.

164. Argañaraz, J.P.; Landi, M.A.; Bravo, S.J.; Gavier-Pizarro, G.I.; Scavuzzo, C.M.; Bellis, L.M. Estimation of Live Fuel Moisture Content From MODIS Images for Fire Danger Assessment in Southern Gran Chaco. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2016**, *9*, 5339–5349, doi:10.1109/JSTARS.2016.2575366.

165. Govender, N.; Trollope, W.S.W.; Van Wilgen, B.W. The effect of fire season, fire frequency, rainfall and management on fire intensity in savanna vegetation in South Africa. *J. Appl. Ecol.* **2006**, *43*, 748–758, doi:10.1111/j.1365-2664.2006.01184.x.

166. *FIRE PARADOX - D3 . 1-2a Review of knowledge gaps and proposal for fuel data*

collection and test runs; 2006;

167. Caccamo, G.; Chisholm, L.; Bradstock, R.; Puotinen, M.; Pippen, B. Monitoring live fuel moisture content of heathland, shrubland and sclerophyll forest in south-eastern Australia using MODIS data. *Int. J. Wildl. Fire* **2012**, *21*, 257–269, doi:10.1071/WF11024.
168. Nelson, R.M. *Chapter 4 - Water Relations of Forest Fuels*; Johnson, E., Miyanishi, K., Eds.; 1st Editio.; Academic Press, 2001; ISBN 9780123866608.
169. Rothermel, R.C. *How to predict the spread and intensity of forest and range fires.*; 1983;
170. Cheney, N.P.; Gould, J.S.; Catchpole, W.R. Prediction of fire spread in grasslands. *Int. J. Wildl. Fire* **1998**, *8*, 1–13, doi:10.1071/WF9980001.
171. Rossa, C.G.; Veloso, R.; Fernandes, P.M. A laboratory-based quantification of the effect of live fuel moisture content on fire spread rate. *Int. J. Wildl. Fire* **2016**, *25*, doi:10.1071/WF15114.
172. Davies, G.M.; Legg, C.J. Fuel Moisture Thresholds in the Flammability of Calluna vulgaris. *Fire Technol.* **2011**, *47*, 421–436, doi:10.1007/s10694-010-0162-0.
173. Jurdao, S.; Chuvieco, E.; Arevalillo, J.M. Modelling fire ignition probability fromsatellite estimates of live fuel moisture content. *Fire Ecol.* **2012**, *8*, 77–97, doi:10.4996/fireecology.0801077.
174. Cheney NP Gould JS Fire Growth in Grassland Fuels. International. *Int. J. Wildl. Fire* **1995**, *5*, 237–247, doi:https://doi.org/10.1071/WF9950237.
175. Pyne, S.J. *Introduction to wildland fire. Fire management in the United States.*; John Wiley & Sons, 1984; ISBN 047109658X.
176. Albini, F.A.; Reinhardt, E.D. Modeling Ignition And Burning Rate Of Large Woody Natural Fuels. *Int. J. Wildl. Fire* **1995**, *5*, 81–91, doi:10.1071/WF9950081.
177. Byram, G.M. Combustion of forest fuels. In *Forest Fire: Control and Use*; Davis, K.P.,

Ed.; McFraw-Hill: New York, NY, 1959; pp. 61–89.

178. KING, N.K. The Influence of Water Vapour on the Emission Spectra of Flames. *Combust. Sci. Technol.* **1973**, *6*, 247–256, doi:10.1080/00102207308952327.

179. Albini, F.A. Dynamics and modelling of vegetation fires: observations. In Proceedings of the Fire in the Environment: The Ecological, Atmospheric, and Climatic Importance of Vegetation Fires; Crutzen, P.J., Goldammer, J.G., Eds.; Wiley: Chichester, 1993; pp. 39–53.

180. Trabaud, L. Inflammabilite et combustibilite des principales especes des garrigues de la region mediterraneenne. *Ecol. Plant.* **1976**, *11*, 117–136.

181. Weise, D.R.; Zhou, X.; Sun, L.; Mahalingam, S. Fire spread in chaparral - "go or no-go?" *Int. J. Wildl. Fire* **2005**, *14*, 99–106, doi:https://doi.org/10.1071/WF04049.

182. Zhou, X.; Weise, D.; Mahalingam, S. Experimental measurements and numerical modeling of marginal burning in live chaparral fuel beds. *Proc. Combust. Inst.* **2005**, *30*, 2287–2294, doi:10.1016/j.proci.2004.08.022.

183. Dickinson, M.B.; Johnson, E.A.; Artiaga, R. Fire spread probabilities for experimental beds composed of mixedwood boreal forest fuels. *Can. J. For. Res.* **2013**, *43*, 321–330, doi:10.1139/cjfr-2012-0291.

184. Catchpole, W.; Marsdens-medley, J. Fire Behaviour Modelling in Tasmanian Buttongrass Moorlands I. Fuel Characteristics. *Int. J. Wildl. Fire* **1995**, *5*, 215, doi:10.1071/WF9950215.

185. Marsden-Smedley, J.B.; Catchpole, W.R. Fire modelling in Tasmanian buttongrass moorlands. III * Dead fuel moisture. *Int. J. Wildl. Fire* **2001**, *10*, 241–253, doi:10.1071/WF01025.

186. Bradshaw, L.S.; Deeming, J.E.; Burgan, R.E.; Cohen, J.D. *The 1978 National fire-danger rating system: Technical documentation*; 1983;

187. Fosberg, M.A.; Schroeder, M.J. *Fine herbaceous fuels in fire-danger rating*; 1971; Vol. Research N;

188. Balbi, J.-H.; Marcelli, T.; Rossi, J.-L.; Chatelon, F.-J. Physical Modeling of Surface Fire Under Nonparallel Wind and Slope Conditions. *Combust. Sci. Technol.* **2010**, *182*, 922–939.

189. Marcelli, T.; Balbi, J.-H.; Moretti, B.; Rossi, J.-L.; Chatelon, F.-J. Flame height model of a spreading surface fire. In Proceedings of the Seventh Mediterranean Combustion Symposium; Chia Laguna, Cagliari, Italy, 2011; pp. 11–15.

190. Balbi, J.-H.; Chatelon, F.J.; Rossi, J.L.; Simeoni, A.; Viegas, D.X.; Rossa, C. Modelling of Eruptive Fire Occurrence and Behaviour. *J. Environ. Sci. Eng. B Former. part J. Environ. Sci. Eng.* **2014**, *3*, 115–132.

191. McCaffrey, B. *Purely buoyant diffusion flames: some experimental results, NBSIR 79-1910*; 1979;

192. Moretti, B. Modélisation du comportement des feux de forêt pour des outils d'aide à la décision, Université de Corse Pasquale Paoli, 2015.

193. Markstein, G.H. Scaling of radiative characteristics of turbulent diffusion flames. *Symp. Combust.* **1977**, *16*, 1407–1419, doi:10.1016/S0082-0784(77)80425-6.

194. Weber, R.O. Analytical models for fire spread due to radiation. *Combust. Flame* **1989**, *78*, 398–408.

195. Butler, B.W.; Anderson, W.R.; Catchpole, E.A. Influence of Slope on Fire Spread Rate. *USDA For. Serv. Proc.* **2007**, 75–82.

196. De Mestre, N.J.; Catchpole, E.A.; Anderson, D.H.; Rothermel, R.C. Uniform Propagation of a Planar Fire front Without Wind. *Combust. Sci. Technol.* **1989**, *65*, 231–2444, doi:10.1080/00102208908924051.

197. Mendes-Lopes, J.M.C.; Ventura, J.M.P.; Amaral, J.M.P. Flame characteristics,

temperature–time curves, and rate of spread in fires propagating in a bed of Pinus pinaster needles. *Int. J. Wildl. Fire* **2003**, *12*, 67–84, doi:10.1071/WF02063.

198. Andrews, P.P. *BEHAVE : Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System - BURN Subsystem, Part 1*; Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT 84401, 1986;

199. Bolstad, P. V.; Vose, J.M.; McNulty, S.G. Forest productivity, leaf area, and terrain in southern Appalachian deciduous forests. *For. Sci.* **2001**, *47*, 419–427, doi:10.1093/forestscience/47.3.419.

200. Aussenac, G.; Granier, A.; Bréda, N. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Rev. For. Française* **1995**, 54–62, doi:10.4267/2042/26624.

201. Jonckheere, I.; Fleck, S.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Coppin, P.; Weiss, M.; Baret, F. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* **2004**, *121*, 19–35, doi:10.1016/j.agrformet.2003.08.027.

202. Rossi, J.-L.; Chetehouna, K.; Collin, A.; Moretti, B.; Balbi, J.-H. Simplified Flame Models and Prediction of the Thermal Radiation Emitted by a Flame Front in an Outdoor Fire. *Combust. Sci. Technol.* **2010**, *182*, 1457–1477, doi:10.1080/00102202.2010.489914.

203. Lhuillier-marchand, A. Propagation des feux de végétation : expérimentations à l'échelle du laboratoire et validation d'un propagateur, Université de Lorraine, 2017.

204. Maréchal, J.; Portier, D. *Feux issus d'un brîleur cylindrique à combustible de type forestier - Dynamique de combustion et propriétés de la flamme - Essais de l'été 2000*; Avignon, 2000;

205. Kane, J.M.; Prat-Guitart, N. Fuel Moisture. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-*

Urban Interface (WUI) Fires; Manzello, S.L., Ed.; Springer Nature Switzerland AG 2019, 2020; p. 13 ISBN 9783319517278.

206. Morvan, D. Numerical study of the behaviour of a surface fire propagating through a firebreak built in a Mediterranean shrub layer. *Fire Saf. J.* **2015**, *71*, 34–48, doi:10.1016/j.firesaf.2014.11.012.

207. Morvan, D. Physical Phenomena and Length Scales Governing the Behaviour of Wildfires: A Case for Physical Modelling. *Fire Technol.* **2011**, *47*, 437–460, doi:10.1007/s10694-010-0160-2.

208. Dupuy, J.L.; Maréchal, J.; Portier, D.; Valette, J.C. The effects of slope and fuel bed width on laboratory fire behaviour. *Int. J. Wildl. Fire* **2011**, *20*, 272–288, doi:10.1071/WF09075.

209. Morvan, D. Physical phenomena in wildfire modelling. In Proceedings of the WIT Transactions on Ecology and the Environment; WIT Press, 2008; Vol. 119, pp. 203–212.

210. Dupuy, J.L.; Morvan, D. Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model. *Int. J. Wildl. Fire* **2005**, *14*, 141–151, doi:10.1071/WF04028.

211. Morvan, D.; Meradji, S.; Mell, W. Interaction between head fire and backfire in grasslands. *Fire Saf. J.* **2013**, *58*, 195–203, doi:10.1016/j.firesaf.2013.01.027.

212. Morvan, D.; Dupuy, J.L. Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combust. Flame* **2001**, *127*, 1981–1994, doi:10.1016/S0010-2180(01)00302-9.

213. Morvan, D.; Méradji, S.; Accary, G. Physical modelling of fire spread in Grasslands. *Fire Saf. J.* **2009**, *44*, 50–61, doi:10.1016/j.firesaf.2008.03.004.

214. Favre, A.; Kavasznay, L.S.G.; Dumas, R.; Gaviglio, J.; Coantic, M. *La turbulence en mécanique des fluides : bases théoriques et expérimentales, méthodes statistiques*;

Gauthier-Villars, 1977;

215. Orszag, S.A. Introduction to renormalization group modeling of turbulence. In *Simulation and modeling of turbulent flows*; Oxford University Press, Inc.: New York, 1996 ISBN 0195106431.

216. Yakhot, V.; Orszag, S.A.; Thangam, S.; Gatski, T.B.; Speziale, C.G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Phys. Fluids A* **1992**, *4*, 1510–1520, doi:10.1063/1.858424.

217. Kee, R.J.; Rupley, F.M.; Miller, J.A. *The Chemkin Thermodynamic Data Base*; Livermore, CA (USA), 1990;

218. Magnussen, B.F.; Hjertager, B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In Proceedings of the Symposium (International) on Combustion; Cambridge, Massachusetts, 1977; Vol. 16, pp. 719–729.

219. Cox, G. *Combustion fundamentals of fire*; London ; San Diego : Academic, Ed.; Academic Press, 1995; ISBN 9780121942304.

220. Syed, K.J.; Stewart, C.D.; Moss, J.B. Modelling soot formation and thermal radiation in buoyant turbulent diffusion flames. In Proceedings of the Symposium (International) on Combustion; 1991; Vol. 23, pp. 1533–1541.

221. Burrows, N.D. Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles. *Int. J. Wildl. Fire* **2001**, *10*, 137–143, doi:10.1071/WF01005.

222. Di Blasi, C.; Branca, C.; Santoro, A.; Gonzalez Hernandez, E. Pyrolytic behavior and products of some wood varieties. *Combust. Flame* **2001**, *124*, 165–177, doi:10.1016/S0010-2180(00)00191-7.

223. Shaw, R.H.; Den Hartog, G.; Neumann, H.H. Influence of foliar density and thermal stability on profiles of Reynolds stress and turbulence intensity in a deciduous forest.

Boundary-Layer Meteorol. **1988**, *45*, 391–409, doi:10.1007/BF00124010.

224. Pope, A.N. Radial flow seals for rotating shafts which deliberately induce turbulent flow along the seal gap 2000.

225. Li, Z.Q.; Wei, F.; Jin, Y. Numerical simulation of pulverized coal combustion and NO formation. *Chem. Eng. Sci.* **2003**, *58*, 5161–5171, doi:10.1016/j.ces.2003.08.012.

226. Joulain, P. Convective and radiative transport in pool and wall fires: 20 years of research in Poitiers. *Fire Saf. J.* **1996**, *26*, 99–149, doi:10.1016/0379-7112(96)00004-5.

227. Larini, M.; Giroud, F.; Porterie, B.; Loraud, J.C. A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. *Int. J. Heat Mass Transf.* **1998**, *6–7*, 881–897, doi:10.1016/s0017-9310(97)00173-7.

228. Pitts, W.M. Wind effects on fires. *Prog. Energy Combust. Sci.* 1991, *17*, 83–134.

229. Siegel, R.; Howell, J.R. *Thermal radiation heat transfer - Third Edition*; Hemisphere Publishing Corporation: Washington DC, USA, 1992; ISBN 0-89116-271-2.

230. Bressloff, N.W. CFD prediction of coupled radiation heat transfer and soot production in turbulent flames, Cranfiels University, 1996.

231. Walls, J.R.; Strickland-Constable, R.F. Oxidation of carbon between 1000-2400°C. *Carbon N. Y.* **1964**, *1*, 333–338, doi:10.1016/0008-6223(64)90288-x.

232. Incropera, F.P.; DeWitt, D.P. *Introduction to heat transfer*; 3rd ed.; Wiley: New York, NY, 2007;

233. Cheney, P.N. Fire behaviour. In Proceedings of the Fire and the Australia Biota; Gill, A., Grooves, R., Noble, I., Eds.; Australian Academy of Science: Canberra, ACT, 1981; pp. 151–175.

234. Kaplan, C.R.; Baek, S.W.; Oran, E.S.; Ellzey, J.L. Dynamics of a strongly radiating unsteady ethylene jet diffusion flame. *Combust. Flame* **1994**, *96*, 1–21, doi:10.1016/0010-2180(94)90154-6.

235. Morvan, D.; Porterie, B.; Larini, M.; Loraud, J.C. Numerical modelling of reverse combustion in a fuel bed of pine needles. In Proceedings of the Fire Safety Science - Sixth International Symposium; Curtat, M., Ed.; International Association for Fire Safety Science: Poitiers, France, 2000; pp. 694–706.

236. Smooke, M.D.; Koszykowski, M.L. Two-dimensional fully adaptive solutions of solid--solid alloying reactions. *J. Comput. Phys.* **1986**, *62*, 1–25.

237. Jang, D.S.; Jetli, R.; Acharya, S. Comparison of the piso, simpler, and simplec algorithms for the treatment of the pressure-velocity coupling in steady flow problems. *Numer. Heat Transf.* **1986**, 209–228, doi:10.1080/10407788608913517.

238. Bellemare, L. Un modèle multiphasique de prédiction du comportement d'un feu de végétation, Université de Provence - IUSTI, 2000.

239. Morvan, D.; Méradji, S.; Accary, G. Physical modelling of fire spread in Grasslands. *Fire Saf. J.* **2009**, *44*, 50–61, doi:10.1016/j.firesaf.2008.03.004.

240. Rossa, C.G. Dynamic Model for Fire Behaviour Prediction, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2009.

241. Catchpole, W.R.; Catchpole, E.A.; Butler, B.W.; Rothermel, R.C.; Morris, G.A.; Latham, D.J. Rate of Spread of Free-Burning Fires in Woody Fuels in a Wind Tunnel. *Combust. Sci. Technol.* **1998**, *131*, 1–37, doi:10.1080/00102209808935753.

242. Martins Fernandes, P.A. Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. *For. Ecol. Manage.* **2001**, *144*, 67–74, doi:10.1016/S0378-1127(00)00363-7.

243. Marsden-Smedley, J.B.; Catchpole, W.R. Fire behaviour modelling in tasmanian buttongrass moorlands ii. Fire behaviour. *Int. J. Wildl. Fire* **1995**, *5*, 215–228, doi:10.1071/WF9950215.

244. Cawson, J.G.; Duff, T.J. Forest fuel bed ignitability under marginal fire weather conditions in Eucalyptus forests. *Int. J. Wildl. Fire* **2019**, *28*, 198–204,

doi:10.1071/WF18070.

245. Wilson, R.A. Reexamination of Rothermel Fire Spread Equations in No-Wind and No-Slope Conditions. *Usda For. Serv. Intermt. Res. Stn. Res. Pap. INT-434* **1990**, 1–13.

246. *Wildland Fire Management Handbook for Sub-Sahara Africa*; Goldammer, J.G., De Ronde, C., Eds.; Global Fire Monitoring Center, 2004; ISBN 191983365X.

247. Susott, R.A. Characterization of the thermal properties of forest fuels by combustible gas analysis. *For. Sci.* **1982**, *28*, 404–420.

248. Valdivieso, J.P.; Rivera, J. de D. Effect of Wind on Smoldering Combustion Limits of Moist Pine Needle Beds. *Fire Technol.* **2014**, *50*, 1589–1605, doi:10.1007/s10694-013-0357-2.

249. Morvan, D. Wind Effects, Unsteady Behaviors, and Regimes of Propagation of Surface Fires in Open Field. *Combust. Sci. Technol.* **2014**, *186*, 869–888, doi:10.1080/00102202.2014.885961.

250. Hansen, F. V *Surface Roughness lengths - ARL-TR-61*; White Sands Missile Range, NM, 1993;

251. Billaud, Y.; Zekri, N.; Kaiss, A.; Drissi, M.; Pizzo, Y.; Acem, Z.; Collin, A.; Santoni, P.A.; Bosseur, F.; Boulet, P.; et al. A hybrid small-world network/semi-physical model for predicting wildfire spread in heterogeneous landscapes. In Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series; IOP Publishing: Poitiers, France, 2012; Vol. 395, p. 8.

252. Awad, C.; Morvan, D.; Rossi, J.-L.; Marcelli, T.; Chatelon, F.J.; Morandini, F.; Balbi, J.-H. Fuel moisture content threshold leading to fire extinction under marginal conditions. *Fire Saf. J.* **2020**, In press, doi:10.1016/j.firesaf.2020.103226.

253. Zhou, X.; Mahalingam, S.; Weise, D. Modeling of marginal burning state of fire spread in live chaparral shrub fuel bed. *Combust. Flame* **2005**, *143*, 183–198, doi:10.1016/j.combustflame.2005.05.013.

254. Burrows, N.D. Fire behaviour in jaffah forest fuels : 1. Laboratory experiments. *CALMScience* **1999**, *3*, 31–56.

255. Fogarty, L.G.; Alexander, M.E. *A field guide for predicting grassland fire potential : derivation and use*; 1999;

256. Hardy, C.C.; Ottmar, R.D.; Peterson, J.L.; Core, J.E.; Seamon, P. *Smoke management guide for prescribed and wildland fire: 2001 edition*; 2001;

257. Leonard, S. Predicting sustained fire spread in tasmanian native grasslands. *Environ. Manage.* **2009**, *44*, 430–440, doi:10.1007/s00267-009-9340-6.

258. Rossa, C.G.; Fernandes, P.M. An Empirical Model for the Effect of Wind on Fire Spread Rate. *Fire 2018, Vol. 1, Page 31* **2018**, *1*, 31, doi:10.3390/FIRE1020031.

259. van Wagtendonk, J.W. Use of a Deterministic Fire Growth Model to Test Fuel Treatments. *Sierra Nevada Ecosyst. Proj. Final Rep. to Congr. vol. II* **1996**, *II*, 1155–1166.

260. Pagni, P.J.; Peterson, T.G. Flame spread through porous fuels. *Symp. Combust.* **1973**, *14*, 1099–1107, doi:10.1016/S0082-0784(73)80099-2.

261. Byram, G.M. Forest fire behaviour. In *Forest Fire: Control and Use*; Davis, K.P., Ed.; McGraw-Hill: New York, NY, 1959; pp. 90–123.

262. Fernandez-Pello, A.C.; Ray, S.R.; Glassman, I. Downward flame spread in an opposed forced flow. *Combust. Sci. Technol.* **1978**, *19*, 19–30, doi:10.1080/00102207808946860.

263. Gould, J. Validation of the Rothermel fire spread model and related fuel parameters in grassland fuels. *Proc. Conf. Bushfire Model. Fire Danger Rat. Syst.* **1991**, 51–64.

264. Ranganathan, A. The Levenberg-Marquardt Algorithm. *Tutoral LM algorithm* **2004**, *11*, 101–110.

265. Fernandes, P.M.; Catchpole, W.R.; Rego, F.C. Shrubland fire behaviour modelling with microplot data. *Can. J. For. Res. Can. Rech. For.* **2000**, *30*, 889–899, doi:DOI

10.1139/cjfr-30-6-889.

266. Frangieh, N. Physique et modélisation du comportement des feux de forêts, Aix-Marseille, 2019.