

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

ECOLE DOCTORALE ED 353

Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels/UMR CNRS 7343

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur de l'Université
d'Aix-Marseille

Discipline : Energétique

Matthieu De Gennaro

Modélisation de la propagation des grands incendies de forêts et élaboration d'un outil opérationnel d'aide à la lutte tactique

Soutenue le 2 juin 2017 devant le jury :

Rapporteurs :

Pascal BOULET, Professeur, LEMTA – Université de Lorraine

Thomas ROGAUME, Professeur, Institut PPRIME - Université de Poitiers

Examineurs :

Anne GANTEAUME, Chargée de Recherche, RECOVER - IRSTEA

Jacques-Henri BALBI, Professeur, SPE – Université de Corse

Jean-Claude LORAUD, Professeur, IUSTI - Aix-Marseille Université

Bernard PORTERIE, Professeur, IUSTI - Aix-Marseille Université (Dir. de thèse)

Invités :

Richard BRU, Président, NOVELTIS

Mahmoud EL HAJJ, Adjoint de la Direction, NOVELTIS

Résumé

Ces travaux de thèse ont porté sur le développement d'un modèle de propagation d'un incendie de forêt et son intégration dans une chaîne opérationnelle d'aide à la lutte tactique. Le modèle de propagation est un modèle sur réseau (la végétation est représentée par un réseau de sites combustibles) qui prend en compte les mécanismes principaux de transfert de chaleur des sites en feu vers les sites sains : rayonnement des braises et des flammes, convection de surface et au sein du végétal, refroidissement radiatif vers l'environnement. Ce modèle tient également compte du relief et des conditions locales de vent et végétation. La simulation « temps réel » a nécessité deux développements distincts. Le premier a consisté à combiner la méthode de Monte Carlo à un algorithme génétique pour créer une base de données des facteurs de vue radiatifs de la flamme sur la végétation environnante, pour une large gamme de propriétés de flammes et de conditions environnementales. Le second repose sur une méthode de suivi du front de feu afin de limiter les données manipulées aux seules données utiles au calcul de sa propagation. La phase de validation a porté sur l'analyse comparative des contours de feux calculés par le modèle avec ceux mesurés lors de deux brûlages dirigés, dont un réalisé en Thaïlande dans le cadre de cette thèse, et ceux mesurés lors de deux feux réels, le feu de Favone de 2009 en Corse et un feu de grande ampleur aux États-Unis. Les performances du modèle, incluant ces avancées, ont été évaluées, montrant sa capacité à simuler en temps réel la propagation du feu en termes de contours et d'aire brûlée. Le modèle a été ensuite étendu pour permettre une évaluation du risque incendie à l'interface forêt-habitat. Dans le cadre du projet TechForFire, porté par la société NOVELTIS, il a été enfin couplé aux différents modules (carte d'occupation des sols, météorologie fine échelle et actions de lutte) de la chaîne opérationnelle. La chaîne complète a été validée sur le feu historique de Velaux de 2015.

Abstract

This thesis work is focused on the development of a wildfire spread model and its integration into a decision-making tool for planning firefighting operations. The fire spread model is based on a network model to represent vegetation distribution on land and considers the main heat transfer mechanisms from burning to unburnt vegetation items (i.e. radiation from the flaming zone and embers, surface convection and wind-driven convection through the fuel bed, and radiative cooling from the heated fuel element to the environment). The effects of local conditions of wind, topography, and vegetation are included. To address the challenge of real-time fire spread simulations, the model is also extended in two ways. First, the Monte Carlo method is used in conjunction with a genetic algorithm to create a database of radiation view factors from the flame to the fuel surface for a wide variety of flame properties and environment conditions. Second, the front-tracking method is introduced in order to reduce the amount of data to store and handle during propagation. The fire spread model is validated against data from different fire scenarios, showing it is capable of capturing the trends observed in experiments in terms of rate of spread, and area and shape of the burn, with reduced computational resources. It is then extended to evaluate fire risk at the wildland fire interface. In the frame of the TechForFire project coordinated by the NOVELTIS company, the new version of the fire spread model is coupled with the other modules of the operational chain. Finally, data from the fire of Velaux in 2015 are used to evaluate the TechForFire solution.

TABLE DES MATIERES

NOMENCLATURE	7
1. INTRODUCTION GENERALE	13
1.1 Problématique des feux de forêts	13
1.2 Les grands incendies de forêts	14
1.3 Echelles mises en jeu – Modèles existants	17
1.4 Modèles de propagation	19
1.4.1 Modèles vectoriels	19
1.4.2 Modèles raster	22
1.5 Objectifs et plan du mémoire	26
2. PRESENTATION DU MODELE DE PROPAGATION	27
2.1 Construction du réseau de sites de végétation	28
2.2 Modèle thermique	30
2.2.1 Hypothèses du modèle	31
2.2.2 Equations générales	33
2.2.3 Convection de surface	35
2.2.4 Convection à l'intérieur de la strate végétale	38
2.2.5 Rayonnement des flammes	38
2.2.6 Rayonnement des braises	40
2.2.7 Pertes radiatives d'un site récepteur	41
2.3 Données d'entrée et paramètres du modèle	42
2.4 Exemple de validation du modèle de propagation	45
2.5 Influence de certains paramètres sur la solution	50
2.5.1 Nombre de quanta par unité de surface de flamme	50
2.5.2 Pas de temps	52
2.5.3 Répétabilité du calcul statistique	55
3. OPTIMISATION DU MODELE	56
3.1 Abaques de rayonnement	57
3.2 Méthode de suivi de front	65
3.3 Evaluation de la performance du modèle optimisé	67
3.3.1 Brûlage dirigé de Cheney et al.	67
3.3.2 Evaluation sur un grand domaine d'étude	70
4. APPLICATIONS	76
4.1 Brûlage dirigé de Chiangmai	76
4.2 Feu de Favone	84
4.3 East Peak Fire	87
5. PPRIF	93
5.1 Contexte	93
5.2 Plan de Prévention des Risques d'Incendies de Forêts (PPRIF)	96

5.2.1	Adaptation du code de propagation	96
5.2.2	Configurations étudiées	97
6.	TECHFORFIRE	104
6.1	Contexte	104
6.2	Développements effectués dans le cadre de T4F	107
6.2.1	Optimisation du temps de calcul	107
6.2.2	Gestion des données d'entrée du modèle	107
6.2.3	Développements complémentaires	109
6.3	Essai sur le feu de Velaux	110
7.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	112
	ANNEXE : INTERSECTION DE QUANTUM PAR LA FLAMME OU PAR LA STRATE	115
	REFERENCES	121

NOMENCLATURE

a	Absorptivité du milieu végétal
a_m, b_m, c_m	Paramètres de l'ellipse associés au facteur de vue F_m (m)
c_p	Chaleur spécifique (J/kg/K)
d_{ij}	Distance entre les sites i et j (m)
D	Diamètre (m)
f	Taux de remplissage (-)
F	Facteur de vue
g	Vecteur accélération de la pesanteur
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m ² /K)
H	Hauteur (m)
\tilde{H}^f	Hauteur de flamme sans vent (m)
i	Site en feu
j	Site récepteur
k	Conductivité thermique (W/m/K)
L	Longueur (m)
L_{vap}^{eau}	Chaleur latente de vaporisation (J/kg)
m	Masse (kg)
m''	Masse par unité de surface (kg/m ²)
\dot{m}	Masse par unité de temps (kg/s)
\vec{n}	Vecteur normal unitaire
N	Nombre de quanta radiatifs
N_{sf}	Nombre de sites en feu
P''	Pouvoir émissif (W/m ²)
Pr	Nombre de Prandtl
q	Energie par unité de temps et de volume (W/m ³)
q_0	Pouvoir radiatif élémentaire, transporté par un quantum radiatif (W)
\dot{Q}	Puissance de flamme (W)
RH	Humidité relative (-)
S	Surface (m ²)
S_q	Somme des gains convectifs et radiatifs diminuée des pertes radiatives (W/m ³)
t	Temps (s)
T	Température (K)
\bar{T}	Température moyenne (K)
U	Vitesse (m/s)
U^t	Vitesse tangentielle du vent (m/s)
V	Volume (m ³)
X_{ij}	Fraction du site j située dans le sillage convectif du site i
γ^{eau}	Teneur en eau (-)

Symboles grecs

α	Fraction volumique de la phase solide (-)
β	Gène utilisé dans l'algorithme génétique
δ	Libre parcours moyen du rayonnement (m)
ε	Emissivité
θ	Angle d'inclinaison de flamme (rd)
ν	Viscosité cinématique (m ² /s)
ρ	Densité volumique (kg/m ³)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (W/m ² /K ⁴), rapport surface-volume des éléments fins (m ⁻¹), écart-type relatif (-)
τ	Temps de résidence de flamme (s), transmittance (-)
χ^r	Fraction de la chaleur de combustion perdue par rayonnement

Indices

∞	Environnement
0	Initial
f	Flamme
i	Site en feu
ign	Inflammation (tas : ignition)
ij	Du site i vers le site j
j	Site sain récepteur
m	Facteur de vue radiatif
$maille$	Maille (ii, kk) de la paroi désignée comme cible
max	Maximal
min	Minimal

Exposants

b	Braises
cc	Convection à la surface d'une paroi cible
ci	Convection à l'intérieur du site récepteur
$cible$	Paroi désignée comme cible lors du calcul convectif
cs	Convection à la surface du site récepteur
DFF	Éléments fins secs (tas : Dry Fine Fuel elements)
eau	Eau
FF	Éléments fins (tas : Fine Fuel elements)
eff	Effectif
f	Flamme
i	Interne
ign	Inflammation
p	Perte
rb	Rayonnement des braises
rf	Rayonnement de la flamme
rl	Pertes radiatives
s	Surface
WFF	Éléments fins humides (tas : Wet Fine Fuel elements)
"	Par unité de surface

Abréviations et acronymes

AG	Algorithme Génétique
DFE	Éléments fins secs
AFT	Version du modèle utilisant les abaques de rayonnement et la méthode de suivi de front
FMC	Teneur en eau (tas : Fuel Moisture Content)
MMC	Version du modèle utilisant la méthode de Monte Carlo
MNT	Modèle Numérique de Terrain
AnoFT	Version du modèle utilisant les abaques de rayonnement
ros	Vitesse de propagation (tas : rate of spread)
tas	Terminologie anglo-saxonne

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cycle feux de forêt/climat.....	13
Figure 2 : (a) Superficie parcourue annuellement par les incendies en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur entre 1973 et 2010 et répartie en différentes classes. (b) Fréquence de feux en fonction de la superficie adimensionnée, en échelles logarithmiques.....	16
Figure 3 : Images satellitaires des feux de Biferno en Italie (a) et de Penteli en Grèce (b). Chaque pixel correspond à une aire de 900 m ² . Ces images sont extraites de Caldarelli et al. (2001).....	17
Figure 4 : Schéma de propagation d'un modèle de type vectoriel elliptique.....	20
Figure 5 : Schéma de principe de la propagation dans un modèle de type « raster ».....	22
Figure 6 : Modèle original de réseau de petit monde de Watts et Strogatz (1998). On distingue les connexions limitées aux plus proches voisins et celles à longue distance (ou courts-circuits) représentées par une ligne rouge.	24
Figure 7 : Modèle de représentation des sites végétaux.	28
Figure 8 : Réseaux monodisperses « cristallins » de remplissages respectifs 0,91 (a) et 0,6 (b), réseau amorphe monodisperse généré à la volée, avec un taux de couverture de 0,525 (c), et réseau amorphe polydisperse de taux de remplissage 0,67 obtenu à partir d'une distribution normale de diamètre moyen 3 m et d'écart type 0,4 m (d).....	30
Figure 9 : Volume élémentaire du site végétal impliqué dans le processus de préchauffage.....	31
Figure 10 : Représentation schématique de la structure du front de feu. Région 1 : zone de préchauffage des sites combustibles sains ; région 2 : front de flammes composé des sites en feu; région 3 : sites brûlés.	33
Figure 11 : Schéma des mécanismes impliqués dans la propagation du feu.	34
Figure 12 : Illustration de l'émission de quanta convectifs depuis le site en feu i et reçus par les sites récepteurs j situés dans son sillage et de l'effet de l'écrantage dû au site en feu k.	37
Figure 13: Organigramme du calcul des paramètres du modèle.....	43
Figure 14 : Evolution au cours du temps de la perte de masse mesurée par le NIST lors de la combustion de pins Douglas (Mell et al., 2009). En trait pointillé, le débit masse est supposé constant pendant le temps de combustion avec flamme, τ	44
Figure 15 : Brûlage dirigé F19 : Représentation schématique des conditions d'allumage et du front du feu, extraite de Mell et al. (2007).	46
Figure 16 : Photographies aériennes du front de feu après 56 et 86s de propagation pour le brûlage dirigé F19 (Cheney et al., 1993, 1998).....	48
Figure 17 : Comparaison entre les résultats expérimentaux (symboles) et la simulation (en rouge) du feu F19 de Cheney. Sont affichés les instantanés de la propagation à 56 et 86 secondes.	49
Figure 18 : Comparaison des simulations effectuées avec les différentes densités de quanta d'émission sélectionnées, pour un pas de temps de 0,1 s.	51
Figure 19 : Evolutions temporelles de la température et de la teneur en eau (FMC) du site js de centre (100 m ; 33 m) pour différents pas de temps.	53
Figure 20 : Comparaison des contours de feu prédits avec des pas de temps de 0,1 s, 0,2 s, 0,5 s et 1 s.	55
Figure 21 : Champ d'iso-facteurs de vue entre une flamme et le sol. La flamme considérée est un cylindre de 2 m de diamètre, 5 m de longueur, incliné de 60° par rapport au sol. L'humidité relative de l'air est de 20%. La flamme est discrétisée en 40 × 40 surfaces élémentaires. Le nombre de quanta émis par unité de surface s'élève à 107.	58
Figure 22 : Système de coordonnées attaché à un site en feu i, pour un iso-facteur m.....	59
Figure 23 : Principe de fonctionnement de l'algorithme génétique.....	63
Figure 24 : Ellipses des iso-facteurs de vue déterminées par l'algorithme génétique dans les conditions de la Figure 21. En trait plein, sont représentés les iso-facteur suivants : $F = [0.37, 0.31, 0.22, 0.14, 0.84 \times 10^{-1}, 3.13 \times 10^{-2}, 1.17 \times 10^{-2}, 4.38 \times 10^{-3}, 1.64 \times 10^{-3}]$. Le disque gris représente la base de la flamme.....	64

<i>Figure 25 : Les différentes étapes de la génération du réseau : (a) un site s'enflamme sur le pixel (i,j) du MNT ; (b) on repère les 8 pixels voisins ; (c) on génère les sites végétaux sur les nouveaux pixels vides.</i>	66
<i>Figure 26 : Comparaison des contours mesurés et prédits avec les versions MMC, AFT et AnoFT après 56 et 86 s de feu.....</i>	68
<i>Figure 27 : Illustration d'un site combustible dans un champ d'iso-facteurs de vue.....</i>	69
<i>Figure 28 : Comparaison des contours obtenus avec la version MMC, sans rayonnement latéral, et la version AFT. Pour ces simulations, le pas de temps est de 0,2 s et le nombre de quanta par mètre carré de flamme est de 200.....</i>	69
<i>Figure 29 : Comparaison des contours calculés avec les versions AFT et AnoFT sur un domaine de 1 km².....</i>	73
<i>Figure 30 : Comparaison des contours calculés avec les versions AFT et AnoFT sur un domaine de 4 km².....</i>	74
<i>Figure 31 : Image du satellite MODIS du 24 Mars 2013, où apparaissent les fumées dues aux feux. Source : NASA EarthObservatory.....</i>	77
<i>Figure 32 : Brûlage de la première parcelle, non étudié.....</i>	78
<i>Figure 33 : Analyse de gaz et de particules sur le terrain.....</i>	79
<i>Figure 34 : En rose, les marqueurs fixés au sommet de bâtons alignés plantés dans le sol.....</i>	79
<i>Figure 35 : Modèle numérique de terrain obtenu par interpolation des points GPS relevés sur le site du brûlage.....</i>	81
<i>Figure 36 : Comparaison entre les contours simulés, en rouge, et les contours expérimentaux, représentés par des lignes avec des symboles associés à chaque instant de la propagation : ▲ à l'instant initial, × à 20 minutes, ■ à 40 minutes, ○ à 60 minutes, et ◆ à 80 minutes de propagation.....</i>	82
<i>Figure 37 : Végétation imbrûlée à l'issue de la simulation. La présence d'amas imbrûlés est conforme aux observations expérimentales.....</i>	83
<i>Figure 38 : Photo prise à la fin du brûlage, révélant des zones imbrûlées.....</i>	84
<i>Figure 39 : Simulation du feu de Favone. Le point A est le point d'éclosion, le point B est la position du feu réel après 29 minutes de propagation, le point C est la position du front de flamme au bout d'une heure de propagation, et le point D au bout de 75 minutes. Les contours simulés (en jaune) sont affichés par intervalle de 15 minutes sans (a) et avec (b) prise en compte des zones supposées inertées par les actions de prévention et de lutte. Le contour réel est symbolisé par un trait blanc.....</i>	86
<i>Figure 40 : Photos prises au cours du East Peak Fire.....</i>	88
<i>Figure 41 : Contours relevés le 21 (en bleu), le 23 (en blanc) et le contour final (en rouge). L'image satellite utilisée est une image de 2016, où apparaissent les vestiges de l'incendie.....</i>	88
<i>Figure 42 : Image en fausses couleurs de l'incendie, en date du 22 juin, publiée par la NASA. On y voit les surfaces brûlées par l'incendie (nuances violacées), les différents types de végétation (herbacées en vert clair, forêt en vert foncé), les zones de feu actives (orange) et les dégagements de fumées.....</i>	89
<i>Figure 43 : Photo de la végétation dans les environs du feu, prise en août 2012.....</i>	90
<i>Figure 44 : Surfaces déjà brûlées le 21 juin et rendues inertes sur la carte de végétation en gris, contour du 23 en rouge. Les points d'éclosion sont symbolisés par des flammes.....</i>	91
<i>Figure 45 : En dégradé de couleur, la propagation simulée par le modèle.....</i>	91
<i>Figure 46 : Simulation type PPRIF, avec une zone débroussaillée de 30 mètres, sans pente.....</i>	99
<i>Figure 47 : Propagation 2D de l'incendie autour de la zone déboisée sur une période de 100 s.....</i>	100
<i>Figure 48 : Évolution de la température de surface de la paroi qui fait face au feu. La figure 3D en bas à droite montre la configuration qui précède le moment où la paroi atteint la température d'inflammation, qui a lieu à 19 s.....</i>	101

<i>Figure 49 : Évolution de la température de surface de la paroi horizontale. La figure 3D en bas à droite montre la configuration qui précède le moment où la paroi atteint la température d'inflammation, qui a lieu à 54 s.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 50 : Description et répartition des lots de travail du projet TechForFire</i>	<i>106</i>
<i>Figure 51 : Chaîne opérationnelle du service TECHFORFIRE</i>	<i>106</i>
<i>Figure 52 : Contour relevé après le feu (a) et contours simulés toutes les 30 minutes par l'outil TechForFire (b). Une nuance de couleur bleue correspond à 30 minutes de propagation. Le polygone vert correspond à une zone d'attaque supposée des personnels de lutte.</i>	<i>111</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Echelles physiques mises en jeu dans un incendie de forêt (Sullivan, 2009).</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2 : Paramètres utilisés pour la simulation du brûlage dirigé F19 de Cheney et al. (1993, 1998). Pour la température des braises, on suppose qu'elles sont en équilibre thermique avec la flamme.</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 3 : Temps CPU et allocation mémoire requis pour simuler 86 s du brûlage dirigé de Cheney et al. avec le modèle de propagation utilisant la méthode de Monte Carlo. Toutes les simulations ont été réalisées sur un seul processeur de type Intel® Xeon® CPU E5-2643 cadencé à 3.30 GHz.</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 4 : écarts relatifs (en %) des vitesses de propagation (ROS), surfaces en feu (FEU) et surfaces brûlées (BRU) par rapport à la simulation de référence (1000 quanta/m² et pas de temps de 0.1s).</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 5 : Influence du nombre de quanta émis par unité de surface de flamme et du pas de temps sur le temps de simulation du cas de Cheney et al.. La durée du feu simulée est de 86s.</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 6 : Ecarts-type relatifs sur la vitesse de propagation du front de tête, l'aire de la surface en feu et celle de la surface brûlée pour 10 répliques de la simulation du cas de Cheney et al.....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 7 : Paramètres de l'algorithme génétique utilisés dans l'exemple de la Figure 21.</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 8 : Temps CPU et allocation mémoire requis pour simuler 86 s du brûlage dirigé de Cheney et al. avec les différentes versions du modèle de propagation. Toutes les simulations ont été réalisées sur un seul processeur de type Intel® Xeon® CPU E5-2643 cadencé à 3.30 GHz.</i>	<i>70</i>
<i>Tableau 9 : Paramètres utilisés dans les simulations destinées à l'évaluation de la méthode de suivi d'interface.....</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 10 : Récapitulatif des performances du modèle avec et sans utilisation du suivi d'interface.</i>	<i>74</i>
<i>Tableau 11 : Paramètres utilisés pour la simulation du brûlage de Chiang Mai. En gras, les paramètres déterminés par des mesures en laboratoire.....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 12 : Paramètres utilisés pour la simulation du feu de Favone (2009). Les paramètres en gras proviennent de mesures en laboratoire.</i>	<i>85</i>
<i>Tableau 13 : Paramètres utilisés pour la simulation du feu du East Peak Fire (2013). Les paramètres en gras proviennent de mesures en laboratoire.</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 14 : Description et numérotation des configurations étudiées.</i>	<i>98</i>
<i>Tableau 15 : Propriétés utilisées pour le calcul des températures des parois.....</i>	<i>99</i>
<i>Tableau 16 : Classification des différentes typologies végétales selon leurs propriétés d'inflammabilité, telle qu'utilisée dans TechForFire, et correspondance avec les classifications utilisées dans les bases de données OCSOL et Corine Land Cover.</i>	<i>108</i>
<i>Tableau 17 : Paramètres utilisés pour la simulation du feu de Velaux (2015). Les paramètres en gras proviennent de mesures en laboratoire.</i>	<i>110</i>

1. INTRODUCTION GENERALE

1.1 Problématique des feux de forêts

Près de 30% des terres émergées de la planète sont directement impliqués par la problématique des feux de forêt (Chuvienco, 2009). Les données statistiques fournies par la FAO (Food and Agriculture Organization) des Nations Unies (FAO, 2007) sur les surfaces brûlées sont partielles et peu précises selon les pays. D'autres analyses conduites à partir de données satellitaires montrent une grande dispersion des estimations de ces surfaces brûlées, de 200 millions d'hectares (Simon et al., 2004) jusqu'à 560 millions d'hectares (Levine et al., 1999). Malgré leur grande variabilité, ces estimations montrent que les feux de forêts sont un enjeu mondial majeur.

De plus, la croissance de l'urbanisation, avec l'augmentation des interfaces périurbaines notamment, et de la fréquence d'apparition d'évènements climatiques extrêmes (sécheresses, orages, tempêtes) liés au réchauffement climatique, ne font qu'aggraver le problème. En retour, l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des incendies de forêts entraîne des émissions de gaz à effet de serre et de particules de plus en plus importantes et donc une altération accrue du climat (Figure 1). En effet, la NASA estime à environ 2.4 gigatonnes par an les émissions de carbone dans l'atmosphère pour les seuls feux tropicaux, soit 30 % des émissions totales (Lien 1 dans les références).

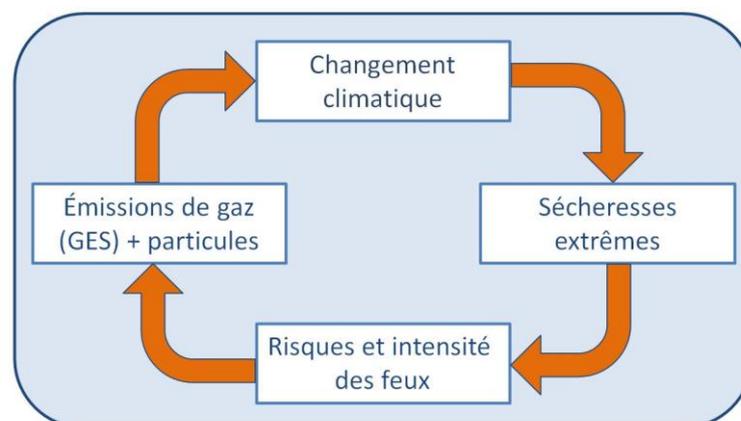


Figure 1 : Cycle feux de forêt/climat.

A noter également que si les interfaces périurbaines sont vulnérables au feu, elles peuvent en être également à l'origine. Cela augmente le risque de départs de feu d'origine anthropique, déjà très supérieur à ceux d'origine naturelle. Le problème des feux à l'interface est aujourd'hui la problématique la plus étudiée par la communauté incendie.

En trente ans, malgré l'efficacité accrue des moyens de lutte, les surfaces brûlées ont doublé et les grands feux deviennent de plus en plus fréquents, avec une tendance à la hausse des dommages causés aux niveaux humain, environnemental et économique. En témoignent les feux exceptionnels de 1997 et 1998 en Indonésie (51000 km²), de 2003 au Portugal (4250 km², 20 morts), de 2005 en Espagne (1900 km², 11 morts), de 2007 en Grèce (2700 km², 80 morts) ou de 2010 en Russie (1935 km², 30 morts). Les pertes économiques liées aux incendies sont considérables puisque Daniell et al., (2016) évalue à 140 milliards de dollars le coût économique du aux incendies de forêt dans le monde, sur une période de 115 ans, entre 1900 et 2015.

Les fumées générées par les incendies de forêts entraîneraient une hausse de mortalité annuelle estimée entre 260 000 et 600 000 morts (Johnston et al., 2012). Sans être létales, les fumées d'incendie peuvent provoquer d'importants troubles respiratoires liés à l'inhalation d'espèces gazeuses polluantes (monoxyde de carbone, oxydes d'azote, dioxyde de soufre, composés organiques, etc.) et de fines particules qui pénètrent aisément dans les poumons. C'est notamment le cas chaque année dans le grand Delta du Mékong, où les écobuages et la culture sur brûlis recouvrent ces régions d'un épais brouillard (tas : haze) de pollution, atteignant des niveaux dangereux pour la santé (PSI¹>300).

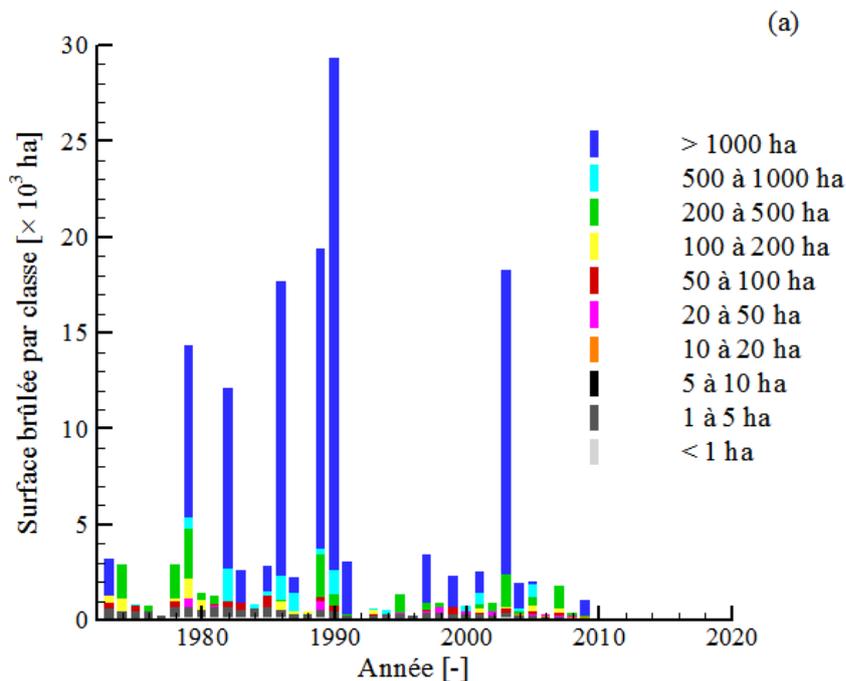
1.2 Les grands incendies de forêts

Un premier constat étayé par les études statistiques sur les incendies de forêts est que, malgré leur faible proportion rapportée au nombre total d'incendies, les grands incendies de forêt (aire brûlée supérieure à 100ha) sont en fait responsables d'une très large proportion des surfaces brûlées. Ainsi, au Canada, de 1957 à 1997, 1% des incendies représente 84% de l'aire totale ravagée par le feu (Stocks et al., 2002). Le constat est le même en Corse, où 0,7% des incendies correspondent à 73% de l'aire totale brûlée (Santoni et Porterie, 2012). La base de données

¹ L'indice de pollution atmosphérique PSI (Pollutant Standards Index) reflète le niveau de six des pires polluants atmosphériques : le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote, le monoxyde de carbone, l'ozone et les particules fines de moins de 10 µ (PM₁₀) et 2,5 µ (PM_{2,5}), selon quatre niveaux de risque : PSI<100 (faible à modéré), 101<PSI<200 (élevé), 201<PSI<300 (très élevé), PSI>300 (extrême).

Prométhée² (2017) permet de dresser le même constat dans toute la région PACA où, de 1996 à 2016, 0,8% des grands incendies sont responsables de 75% des surfaces brûlées.

Il a ainsi été démontré que les incendies de forêt suivent une loi de Pareto³ : un feu de grande amplitude est relativement rare, alors qu'inversement, un feu de faible ampleur a de fortes chances de se produire. Les diagrammes (a) et (b) de la Figure 2 ont été obtenus à partir des données relatives aux incendies qui ont eu lieu entre 1973 et 2010 dans la région PACA. La Figure 2a montre la superficie brûlée chaque année par les incendies, répartie en fonction de leur taille. La Figure 2b est obtenue en traçant en échelle logarithmique la fréquence des feux recensés en fonction de leur superficie adimensionnée par la superficie minimale observée. La distribution du nombre de feux en fonction de la surface brûlée suit une loi de puissance de type Pareto.



² Conçue et lancée en 1973, Prométhée est une base de données sur les incendies de forêts de la région méditerranéenne. Les informations rassemblées couvrent 15 départements du Sud-Est de la France. Ce site permet notamment d'obtenir un bilan annuel des feux de forêt ainsi que des statistiques par département telles que le nombre de départ de feux, leur taille, etc.

³ On rappelle que si une variable aléatoire X suit une loi de Pareto de paramètres (x_{min}, k) , alors la distribution est donnée par $Prob(X > x) = \left(\frac{x}{x_{min}}\right)^{-k}$ avec $k > 0$ et $x \geq x_{min}$. Pour les feux de forêts, $x_{min} \approx 1ha$ et $k \approx 0.833$.

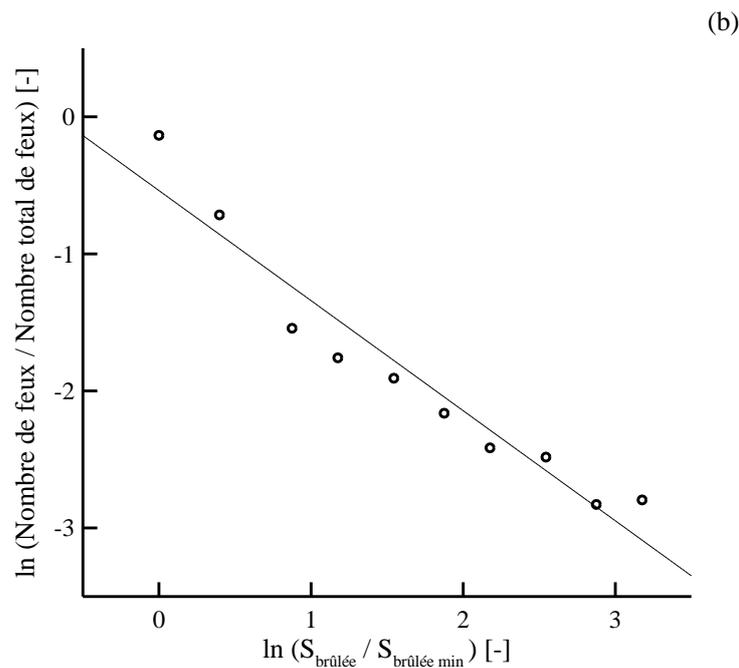


Figure 2 : (a) Superficie parcourue annuellement par les incendies en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur entre 1973 et 2010 et répartie en différentes classes. (b) Fréquence de feux en fonction de la superficie adimensionnée, en échelles logarithmiques.

Un deuxième constat est que l'aire brûlée par les grands incendies est rarement homogène, mais plutôt de nature fractale, comme on le voit sur les images satellitaires des aires brûlées par les feux de Biferno et Penteli (Figure 3). Ce comportement fractal se caractérise par la présence d'amas imbrûlés, de lacunarités et de digitations. Les dimensions fractales du périmètre de feu et de l'aire brûlée sont des indicateurs du rôle joué par les hétérogénéités locales (végétation, relief, vent) que le feu a rencontrées lors de sa propagation. L'étude du comportement fractal a fait l'objet de nombreuses études (par exemple, Caldarelli, 2001, Porterie et al., 2007a; Porterie et al., 2008).

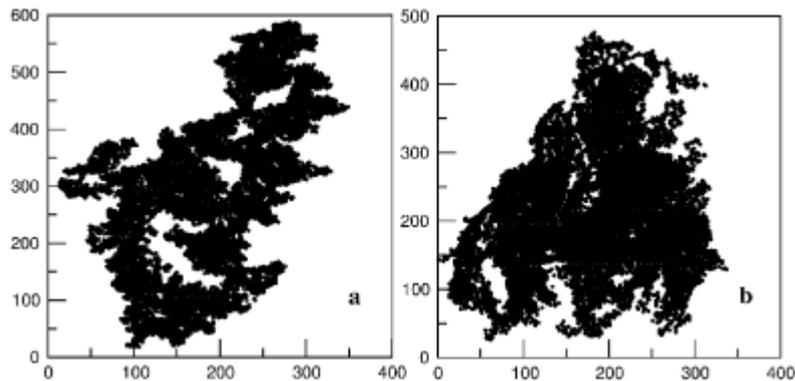


Figure 3 : Images satellitaires des feux de Biferno en Italie (a) et de Penteli en Grèce (b). Chaque pixel correspond à une aire de 900 m². Ces images sont extraites de Caldarelli et al. (2001).

1.3 Echelles mises en jeu – Modèles existants

La modélisation des feux de forêt est une problématique étudiée de longue date par la communauté scientifique, comme en témoignent les articles de revue de Pastor et al. (2003), Sullivan (2009) ou encore Papadopoulos et Pavlidou (2011). Le caractère multi-échelle et multi-physique des incendies implique ainsi une multitude d'approches nécessaires à la compréhension et à la simulation de ces phénomènes. Les phénomènes physiques mis en jeu et les échelles qui leur sont associées sont répertoriés dans le Tableau 1 établi par Sullivan (2009).

Tableau 1 : Echelles physiques mises en jeu dans un incendie de forêt (Sullivan, 2009).

Type	Échelle temporelle [s]	Échelle verticale [m]	Échelle horizontale [m]
Combustion	0,0001-0,01	0,0001-0,01	0,0001-0,01
Combustible	-	0,001-0,01	0,001-0,01
Flammes	0,1-30	0,1-10	0,1-2
Rayonnement	0,1-30	0,1-10	0,1-50
Conduction	0,01-10	0,01-0,1	0,01-0,1
Convection	1-100	0,1-100	0,1-10
Turbulence	0,1-1000	1-1000	1-1000
Panache	1-10000	1-10000	1-100

Dans le domaine des feux de végétation, on distingue généralement deux échelles : l'échelle macroscopique (celle de la flamme) et l'échelle gigascopique (celle des images aériennes ou satellitaires). Quant aux phénomènes qui se produisent aux échelles inférieures, les échelles microscopique (celle du site végétal) ou mésoscopique (celle d'un élément fin végétal : aiguille, brindille, petite branche, feuille, *etc.*), ceux-ci sont globalisés au travers de termes source dans les équations moyennées qui régissent le feu aux échelles supérieures. C'est le cas des processus de déshydratation, de pyrolyse et d'oxydation du résidu carbonneux, mais aussi des processus d'échange entre la phase solide (la végétation) et la phase gazeuse.

L'échelle macroscopique, celle de la flamme, est l'échelle à laquelle les transferts thermiques qui pilotent la propagation du feu d'un site à un autre ont lieu : rayonnement de la flamme et des braises, conduction en phase solide et en phase gazeuse, convection des gaz chauds poussés par le vent. A cela s'ajoute les échanges de chaleur avec l'environnement. Si la conduction est un phénomène de courte portée, de l'ordre du centimètre (Tableau 1), les autres modes de transferts opèrent sur des distances caractéristiques bien plus grandes, typiquement plusieurs dizaines de mètres pour le rayonnement et la convection. La réaction de combustion génère des gaz chauds entraînant de fortes variations de masse volumique, ce qui accroît la flottabilité du gaz. La convection induite peut alors conduire à un écoulement turbulent dont les échelles mises en jeu dans un incendie de forêt couvrent un très large spectre, allant de l'échelle de la flamme à celle de la couche limite atmosphérique (Tableau 1). Les modèles conçus à l'échelle macroscopique sont des modèles de combustion, appelés également modèles détaillés ou physiques (Grishin, 1996 ; Porterie et al., 2000 et 2007b ; Linn et al., 1997 ; Mell et al., 2006 ; Morvan et al., 2004 et 2009). Ils reposent, pour la plupart, sur une description diphasique de l'écoulement et présentent une grande généralité. La plupart des phénomènes de base qui régissent l'éclosion et la propagation du feu sont généralement pris en compte : transport de gaz, turbulence, dégradation thermique du matériau, combustion turbulente, rayonnement, échanges entre le gaz et le milieu solide. Un modèle détaillé requiert la résolution numérique des équations de bilan de masse, d'énergie, et de quantité de mouvement pour la phase gazeuse et chaque classe de particules solides et de l'équation du transfert radiatif. Une simulation réaliste nécessite donc de résoudre un système comportant plusieurs dizaines d'équations aux dérivées partielles non linéaires et fortement couplées. Le temps de résolution numérique important qui en résulte limite les applications à des domaines de faible étendue, typiquement de quelques centaines de mètres dans les trois directions d'espace. Ces modèles détaillés peuvent par exemple être utilisés pour traiter le problème des feux de forêts à l'interface (Linn, 1997 ; Porterie et al., 2007b). Ils peuvent également être vus comme des modèles de connaissance, permettant de mieux

comprendre le comportement du feu, de tester des hypothèses alternatives ou d'enrichir les modèles réduits, mais ne sont pas adaptés à la simulation de la propagation des incendies de grande ampleur.

A l'échelle gigascopique, celle des images aériennes ou satellitaires, le front de feu peut être vu comme une ligne, séparant le combustible brûlé et imbrûlé, se déplaçant sur une surface. C'est à cette échelle que le feu est influencé par les hétérogénéités dues au relief, aux conditions atmosphériques (le vent, l'ensoleillement, la température atmosphérique ou encore l'hygrométrie) ou à la végétation. En présence de fortes hétérogénéités, le feu peut avoir, comme évoqué précédemment, un comportement fractal plus ou moins prononcé (Caldarelli et al., 2001). Les sautes de feu, sous l'action des brandons émis par le front de flammes et transportés par le vent (Tarifa et al., 1965 ; Albin, 1979, Tse and Fernandez-Pello, 1998 ; Sardoy et al., 2007 et 2008) sur des distances pouvant atteindre plusieurs kilomètres, constituent un mode de propagation par transfert de masse dont la portée est essentiellement gigascopique. Les modèles utilisés à cette échelle sont des modèles de propagation.

1.4 Modèles de propagation

Dans ce paragraphe, nous présentons les deux classes de modèles de propagation : les modèles vectoriels et les modèles rasters. Nous ne détaillerons pas les modèles, dits empiriques (Pastor et al., 2003 ; Sullivan, 2009), qui reposent sur une analyse statistique d'observations de feux passés, expérimentaux ou réels. En effet, si les modèles empiriques sont faciles à mettre en œuvre et très rapides, leur domaine de validité est restreint aux conditions pour lesquelles ils ont été établis, ce qui les rend difficilement incorporables dans un outil d'aide à la décision.

1.4.1 Modèles vectoriels

Les modèles vectoriels reposent, pour la plupart, sur le principe de Huygens qui considère une propagation elliptique en chaque point du front de feu avant. Initialement développé pour des milieux homogènes et continus, il a été depuis étendu à des milieux non-uniformes (Anderson et al., 1982; Richards, 1990, 1995; Richards et Bryce, 1996). A chaque instant t , le front de feu est constitué d'un ensemble de points considérés comme autant de départs de feu. Le nouveau contour est obtenu en prenant la courbe des enveloppes à l'instant $t + \Delta t$ (Figure 4).

Les paramètres de l'ellipse sont reliés à la vitesse de propagation au moyen de lois empiriques. Comme le souligne Finney (2004), la principale difficulté d'application de ce type de modèle réside dans la détermination de ces paramètres géométriques puisque, selon la loi empirique utilisée, différentes formes d'ellipse peuvent être obtenues pour une même vitesse de vent.

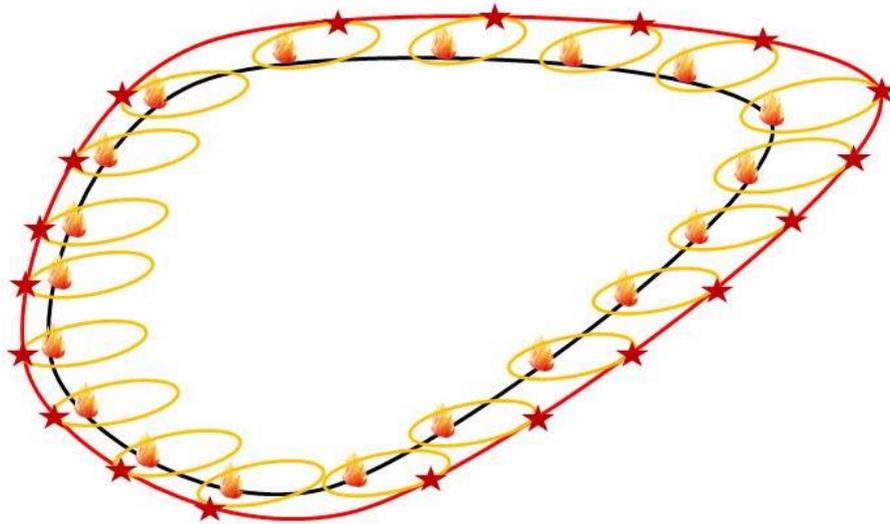


Figure 4 : Schéma de propagation d'un modèle de type vectoriel elliptique.

Les simulateurs vectoriels les plus connus et les plus utilisés par la communauté incendie et par certaines agences gouvernementales sont PROMETHEUS et FARSITE (Finney, 1994). Tous deux intègrent des données sous forme matricielle concernant les conditions locales de végétation, de vent et de relief. En revanche, ils diffèrent par les modèles de comportement et de combustibles.

Le simulateur FARSITE (pour Fire AREA Simulator) incorpore plusieurs sous-modèles de comportement de feu : le modèle de Van Wagner (1977) pour les feux de cimes, le modèle de Rothermel (1972, 1991) pour les feux de surface, ou encore les modèles d'Albini (1979) pour les sautes de feu et de Nelson (2000) pour l'évolution de la teneur en eau des végétaux. Les principaux intrants du simulateur FARSITE se présentent sous forme de fichiers relatifs aux caractéristiques locales du terrain (élévation, pente, exposition) et de la végétation (couverture de la canopée, modèle de combustible), à la teneur en eau des végétaux et aux conditions météorologiques (vent, température, précipitation et humidité relative). L'utilisateur a également la possibilité d'ajouter des intrants liés à l'action des moyens de lutte, aériens et terrestres. En ce

qui concerne le modèle de combustible⁴ (tas : fuel model), FARSITE contient la base à 11 combustibles d'Anderson (1982), améliorée et complétée par 2 autres combustibles par Albini (1976) et celle dynamique (le combustible vivant peut se transformer, durant la saison sèche, en combustible mort selon sa teneur en eau) à 40 combustibles de Scott et Burgan (2005). D'autres modèles peuvent y être incorporés par l'utilisateur, sous réserve de compatibilité avec le modèle de Rothermel.

PROMETHEUS simule la propagation du feu en combinant les équations dérivées par Richards (1999), sur la base du principe de Huygens, et le système de prédiction canadien FBP (Canadian Forest Fire Behaviour Prediction) qui associe le vent, la teneur en eau et 16 types de végétation. Le système FBP repose sur certaines hypothèses, considérant un couvert uniforme et continu, une topographie simple et uniforme ou un vent constant et unidirectionnel, autant d'hypothèses qui limitent son domaine d'application. Les intrants du simulateur sont moins complets que ceux de FARSITE, avec notamment une base de 16 combustibles adaptée au système FBP.

Une méthode alternative, développée par Balbi (2007, 2009, 2010) et étendue récemment à la simulation temps réel à grande échelle par Santoni (2011), décompose le front de flamme en une succession de segments. La propagation se fait ensuite, à chaque étape de temps et pour chaque point reliant les segments, selon une direction définie par la composition entre le vent et la pente, et à une vitesse basée sur une modélisation simplifiée des différents mécanismes physiques mis en jeu lors d'un incendie. Le simulateur développé par le laboratoire SPE (Sciences Pour l'Environnement de l'Université de Corte), appelé FOREFIRE, a été couplé à un modèle météorologique afin de décrire l'interaction feu/atmosphère. Les premiers résultats sont encourageants (Filippi et al., 2011).

D'autres modèles, moins répandus, sont également utilisés en tant qu'outil d'aide à la décision, et présentent le même principe de fonctionnement. On peut citer, entre autres, les simulateurs Portable Fire Growth Model (Shamir, 2006), SiroFire (Gould, 2007) ou encore Phoenix (Tolhurst, 2006, 2008a&b).

⁴ La base combustible inclut les données suivantes : la charge par catégorie de végétation (mort ou vivant) et par classe de taille des éléments qui la constituent, le rapport surface/volume de ces éléments, la puissance énergétique disponible par catégorie, l'épaisseur du lit de combustible, la teneur en eau au-delà de laquelle l'extinction a lieu.

1.4.2 Modèles raster

Les modèles raster sont basés sur la description du couvert végétal comme un ensemble de sites de formes régulières ou irrégulières, sur lesquelles se propage le feu en fonction de règles de contamination spécifiques ou de probabilités d'occurrence (Figure 5).

Parmi les modèles raster développés et utilisés dans la communauté incendie, on citera le modèle IGNITE (Green et al., 1990), DYNAFIRE (Kalabokidis et al., 1991) ; FireMap (Ball et Guertin, 1992, Vasconcelos et Guertin, 1992) ; le modèle présenté par Karafyllidis et Thanailakis (1997), et ensuite développé par Berjack et Hearne (2002) ; Geofogo, développé par Vasconcelos et al., 1998 ; FireStation, de Lopez, 1998 ; Extended Swarm, de Li et Magill, 2001 ; FlamMap, développé par Finney, 2006.

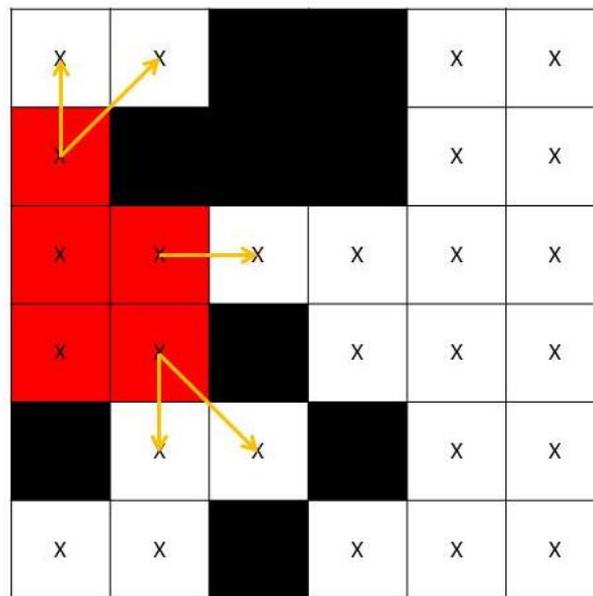


Figure 5 : Schéma de principe de la propagation dans un modèle de type « raster ».

Le plus simple de ces modèles est le modèle de percolation pour lequel la propagation se fait de proche en proche, un site en feu ne pouvant toucher que ses plus proches voisins. L'évolution de l'état d'un site (sain, en feu, brûlé) dépend de l'état des sites voisins et de règles de transition qui peuvent être stochastiques ou déterministes. Différents types de voisinages sont utilisés : le voisinage de Von Neumann à 4 voisins, le voisinage de Moore à 8 voisins, ou plus rarement une combinaison de ces voisinages à 12 voisins. Selon le voisinage considéré, les propriétés de percolation (seuil, taille et nombre d'amas) et de propagation diffèrent. La propagation va également dépendre du dopage, défini comme le rapport du nombre de sites

combustibles sur le nombre total de sites. Un modèle de percolation est très simple à mettre en œuvre, mais il ne permet pas d'inclure les effets à longue distance, au-delà des plus proches voisins, comme le rayonnement des flammes, la convection des gaz chauds ou les projections de brandons à l'origine des sautes de feu (De Gennes, 1976). Ils ne permettent pas non plus de reproduire les propriétés fractales observées dans les grands incendies.

Basé sur le même principe de contamination, on trouve ensuite les automates cellulaires qui se distinguent des modèles de percolation par leur loi de contamination (i.e. la pondération de la contamination entre les voisins ajoute une dynamique de propagation) et donc, indirectement, par leur définition du voisinage. Ainsi, l'état d'un site au temps $t+\Delta t$ est fonction de l'état au temps t d'un nombre fini de sites voisins. Cette amélioration va dans le bon sens puisque la loi de contamination tente de prendre en compte les effets collectifs sur la propagation. La première utilisation des automates cellulaires pour modéliser la propagation des feux de forêt est à attribuer à Kourtz et O'Reagan (1971). Par la suite, on notera les travaux remarquables d'Albinet et al. (1986), de Stauffer et Aharony (1991), de Téphany et al. (1997), et plus récemment d'Hargrove et al. (2000). Bien qu'elle donne des résultats qualitativement corrects, cette approche est limitée par son incapacité à modéliser les mécanismes physiques fondamentaux qui régissent la propagation du feu, notamment les effets à longue distance. De plus, l'utilisation de coefficients de pondération empiriques limite la portée de ces modèles aux conditions pour lesquelles ces coefficients ont été établis.

Le modèle de réseau de petit monde (tas : small-world network), développé initialement par Watts et Strogatz (1998) permet de répondre en partie à la nécessité de décrire les effets à longue distance. Un réseau de petit monde utilise en effet deux types de connections, les unes impliquant les plus proches voisins au sens de Von Neumann, les autres à longue distance, appelées courts-circuits. Ces dernières sont engendrées aléatoirement avec une probabilité uniforme sur tout le réseau. La Figure 6 illustre le modèle original de petit monde.

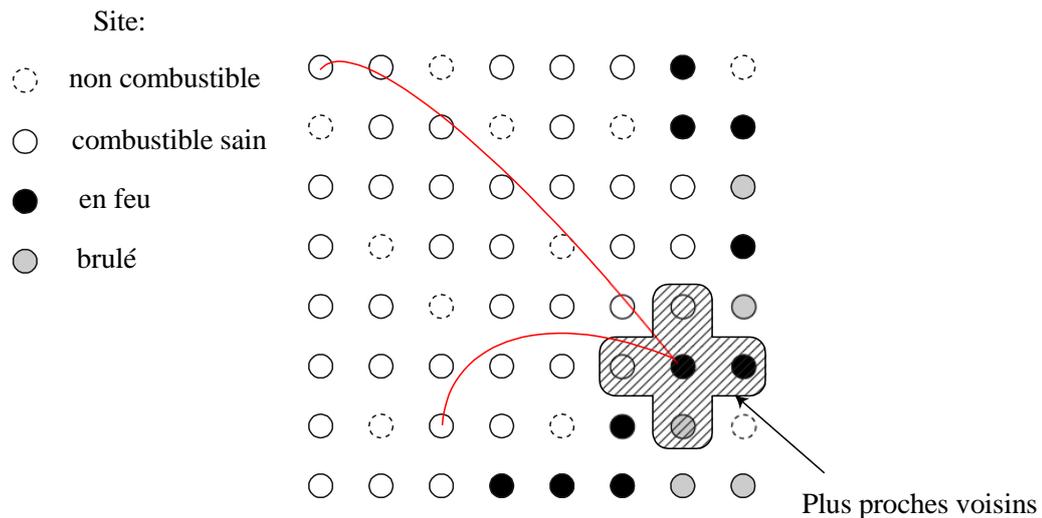


Figure 6 : Modèle original de réseau de petit monde de Watts et Strogatz (1998). On distingue les connexions limitées aux plus proches voisins et celles à longue distance (ou courts-circuits) représentées par une ligne rouge.

Conceptuellement, le modèle de réseau est une réelle avancée par rapport aux automates cellulaires. Malheureusement, son application directe à un incendie de forêt ne permet pas de décrire correctement son évolution, en raison des limitations dues au voisinage de Von Neumann et au caractère purement probabiliste des connexions entre sites. Pour pallier ce problème, dès 2005, le modèle de petit monde a été étendu par l'équipe Dynamique des Feux de l'IUSTI. La première adaptation du modèle à la propagation des feux de forêts, décrite en détail dans Porterie et al. (2005a, 2005b, 2007a) et Zekri et al. (2005), a consisté à remplacer le voisinage de Von Neumann d'un site en feu par une zone d'interaction elliptique (représentatif de l'impact radiatif et convectif du site en feu), bien au-delà des plus proches voisins, et à donner un caractère déterministe aux connexions à longue distance. Dans les articles mentionnés ci-dessus, ces connexions à longue distance correspondent à l'émission de brandons à partir du front de flammes. Les résultats obtenus ont permis de caractériser l'influence des dimensions caractéristiques de la zone d'interaction, de l'émission des brandons et de l'hétérogénéité du milieu sur la propagation.

La deuxième version du modèle de petit monde, présentée dans Adou et al. (2010), a consisté à introduire plus de physique en se limitant volontairement aux cas où la propagation est essentiellement due au rayonnement des flammes. Le rayonnement y était calculé par la méthode de Monte Carlo et l'inflammation des sites récepteurs était basée sur le concept d'une énergie critique d'inflammation. Appliqué à des brûlages dirigés et des feux réels, les résultats obtenus ont montré la capacité du modèle à reproduire les tendances observées en termes de contours de

feu et de propriétés fractales. Néanmoins, cette deuxième version du modèle manquait de généralité dans la mesure où il négligeait tous les autres mécanismes de transfert d'énergie des sites du front de flammes vers les sites sains environnants. De plus, il ne permettait pas de décrire correctement le refroidissement radiatif du site récepteur vers l'environnement, pour la raison simple que la température du site exposé au feu n'était pas connue. A titre d'exemple, un site récepteur exposé longtemps à un feu qui se propage lentement pourra accumuler de l'énergie sans se refroidir par rayonnement vers l'environnement, et dans certains cas s'enflammer, ce qui n'est pas toujours réaliste. C'est la raison pour laquelle, dans les articles de Billaud et al. (2012) et Drissi et al. (2013), un modèle thermique a été introduit. Il repose sur l'équation de conservation de l'énergie appliquée à chaque site récepteur, ce qui permet d'accéder à sa température et donc de bien évaluer les transferts de chaleur des sites en feu vers le site récepteur et du site récepteur vers l'environnement, mais aussi de mieux caractériser l'inflammation de la végétation exposée au feu. Dans ce travail, les échanges thermiques considérés étaient la convection due aux gaz chauds poussés par le vent, le rayonnement des flammes et le refroidissement radiatif des végétaux sains vers l'environnement. L'analyse comparative des résultats de simulation avec les observations réalisées sur le brûlage dirigé de Cheney et al. (1993) et sur le feu de Favone (Corse) de 2009 a montré un bon accord. Cependant, le modèle développé souffrait de deux handicaps majeurs. Le premier concerne l'omission d'autres modes de transfert, en particulier le rayonnement des braises et la convection dans la strate végétale, dont les contributions ne peuvent être négligées, notamment lorsque la porosité de la strate végétale est élevée. Le second est relatif aux ressources informatiques (temps CPU et allocation mémoire) nécessaires aux simulations numériques, incompatibles avec le caractère opérationnel que l'on souhaite donner au simulateur.

1.5 Objectifs et plan du mémoire

Ce manuscrit présente les derniers développements du modèle de propagation destinés à élargir son domaine d'application et à lui donner un caractère « temps réel » permettant son intégration dans un outil opérationnel d'aide à la lutte tactique contre les incendies de forêt, dans le cadre du projet TechForFire coordonné par la société NOVELTIS.

Le chapitre 2 détaille le modèle mathématique, dont ses principales hypothèses et l'approche thermique décrivant l'évolution d'un site exposé au front de flammes, la procédure de détermination des paramètres du modèle et un exemple de validation.

Dans le chapitre 3, on décrit les développements effectués afin de réduire les ressources informatiques nécessaires aux simulations. Les performances du modèle « temps réel » sont évaluées en termes de qualité de la solution, de temps CPU et d'allocation mémoire.

Le chapitre 4 est consacré à la validation du modèle « temps réel » sur un brûlage dirigé réalisé en Thaïlande pour cette étude, et deux feux réels, dont un de grande ampleur.

Le chapitre 5 explore l'une des applications possibles du modèle « temps réel », à savoir l'évaluation du risque incendie à l'interface forêt-habitat.

Le chapitre 6 est une description du projet TechForFire dans lequel s'insèrent ces travaux de thèse et pour lequel le modèle « temps réel » est couplé aux autres modules de la chaîne opérationnelle (carte d'occupation des sols, cartographie du vent, actions de lutte). On présente enfin les résultats de la phase de validation de la chaîne complète TechForFire sur le feu historique de Velaux de 2015.

2. PRESENTATION DU MODELE DE PROPAGATION

Dans le modèle de propagation proposé, le milieu végétal est représenté par un réseau de sites combustibles dont la répartition dépend de la topographie du terrain, donnée par un Modèle Numérique de Terrain (MNT), et de la carte d'occupation des sols. Afin de décrire au mieux les différentes couvertures végétales, les sites combustibles peuvent être répartis sur le terrain de manière régulière (réseau cristallin) ou non (réseau amorphe), avec des sites de tailles quasiment identiques (réseau monodisperse) ou présentant une distribution en taille (réseau polydisperse). Un paramètre important est le taux de couverture végétale, définie comme la proportion de la surface au sol couverte par la végétation.

Le réseau est donc constitué de sites combustibles qui peuvent se trouver dans des états différents selon que le site est sain, en feu ou brûlé. Modéliser la propagation du feu consiste alors à suivre au cours du temps les changements d'états des sites du réseau. L'ensemble des sites en feu forme ainsi un front « discret » de feu.

Dans ce chapitre, on présente tout d'abord la procédure de construction du réseau de sites de végétation, qu'il soit cristallin ou amorphe, mono ou polydisperse, puis les équations du modèle thermique ainsi que les hypothèses et les données d'entrée sur lesquelles ce modèle repose. Le modèle est ensuite validé sur un brûlage de référence, le feu expérimental de Cheney et al. (1993, 1998). Ce chapitre se termine par une discussion sur la répétabilité du calcul statistique et sur l'influence du pas de temps et du nombre de quanta émis par unité de surface de flamme sur la solution.

2.1 Construction du réseau de sites de végétation

Dans le présent modèle, les sites végétaux sont représentés par des cylindres de hauteur H et de diamètre D (Figure 7).

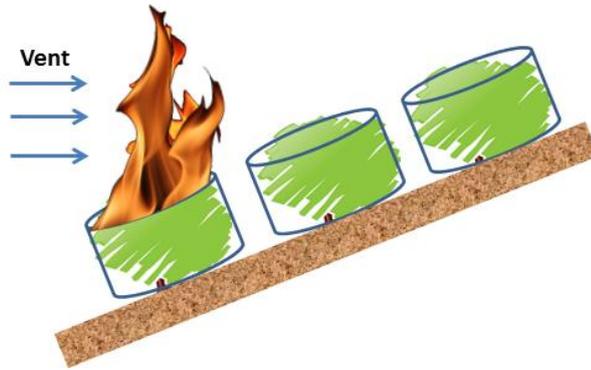


Figure 7 : Modèle de représentation des sites végétaux.

Dans ce qui suit, le réseau est dit cristallin ou amorphe selon que la répartition des sites combustibles est régulière ou aléatoire. Il est mono ou polydisperse selon que la distribution en diamètre des sites est uniforme ou non.

Pour représenter une végétation continue, comme par exemple une prairie d'herbacées, on utilise un réseau cristallin où chaque site combustible est placé aux sommets de triangles équilatéraux de côté D_{max} , les sites étant en contact les uns les autres (Figure 8a, avec $D_{max} = 3$ m. Le taux de remplissage est alors maximum et donné par : $f_{max} = \pi/2\sqrt{3} \sim 0,91$. Lorsque la végétation est répartie de façon régulière, mais que les sites qui la composent ne sont pas en contact, le taux de remplissage se déduit du précédent par la relation $f/f_{max} = (D/D_{max})^2$ où D est le diamètre des sites ($D \leq D_{max}$). La Figure 8b montre un réseau cristallin de sites de diamètre $0,812D_{max}$, donnant un taux de remplissage de 0,6. En suivant la même logique, il est alors possible de générer un réseau cristallin polydisperse, en disposant aux sommets des triangles équilatéraux des sites dont le diamètre suit une distribution aléatoire ou prédéfinie (une distribution normale, autour d'un diamètre moyen, par exemple) sans dépasser D_{max} . Le taux de remplissage obtenu dépend de la forme de la distribution en diamètre des sites.

Lorsque la végétation est composée de sites de diamètre identique et ne présente pas de régularité dans sa répartition spatiale, un réseau amorphe monodisperse peut être obtenu en générant « à la volée », de manière aléatoire, la position de chaque site combustible. L'exemple

donné sur la Figure 8c correspond à un réseau de sites de diamètre 3 m. L'expérience montre que l'utilisation de cette technique conduit à des taux de couverture rarement supérieurs à 0,56.

Des taux de remplissage plus élevés peuvent être obtenus lorsque la distribution en diamètre des sites n'est pas uniforme. Un exemple de réseau amorphe polydispense est donné sur la Figure 8d, conduisant à un taux de remplissage de 0,67. Ce type de réseau, plus proche de la réalité de terrain, peut également être construit en utilisant d'autres méthodes comme la méthode de Box-Muller (Box et Muller, 1958), la minimisation de fonctionnelle basée sur la distance entre sites ou l'algorithme génétique (Drissi, 2013). Contrairement aux deux autres méthodes, l'algorithme génétique permet de bien maîtriser l'amorphisme et la polydispersité. La contrepartie est qu'il nécessite un temps de calcul important.

Pour achever l'implantation des sites sur le paysage, il est nécessaire d'affecter à chacun d'eux une altitude. Pour cela, on calcule l'altitude du site par interpolation bilinéaire des altitudes des quatre sommets du pavé MNT auquel appartient le site.

Chacun des sites combustibles du réseau possède ses caractéristiques propres, comme son type de végétation, sa hauteur et son diamètre, sa charge, ses propriétés thermiques et radiatives, etc. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe 2.3. Il est également possible de modifier les caractéristiques d'un site végétal en cours de propagation. A titre d'exemple, un site végétal peut devenir incombustible s'il se trouve dans une zone traitée par les moyens de lutte aériens ou terrestres. Cette gestion dynamique des sites se fait à chaque étape de temps.

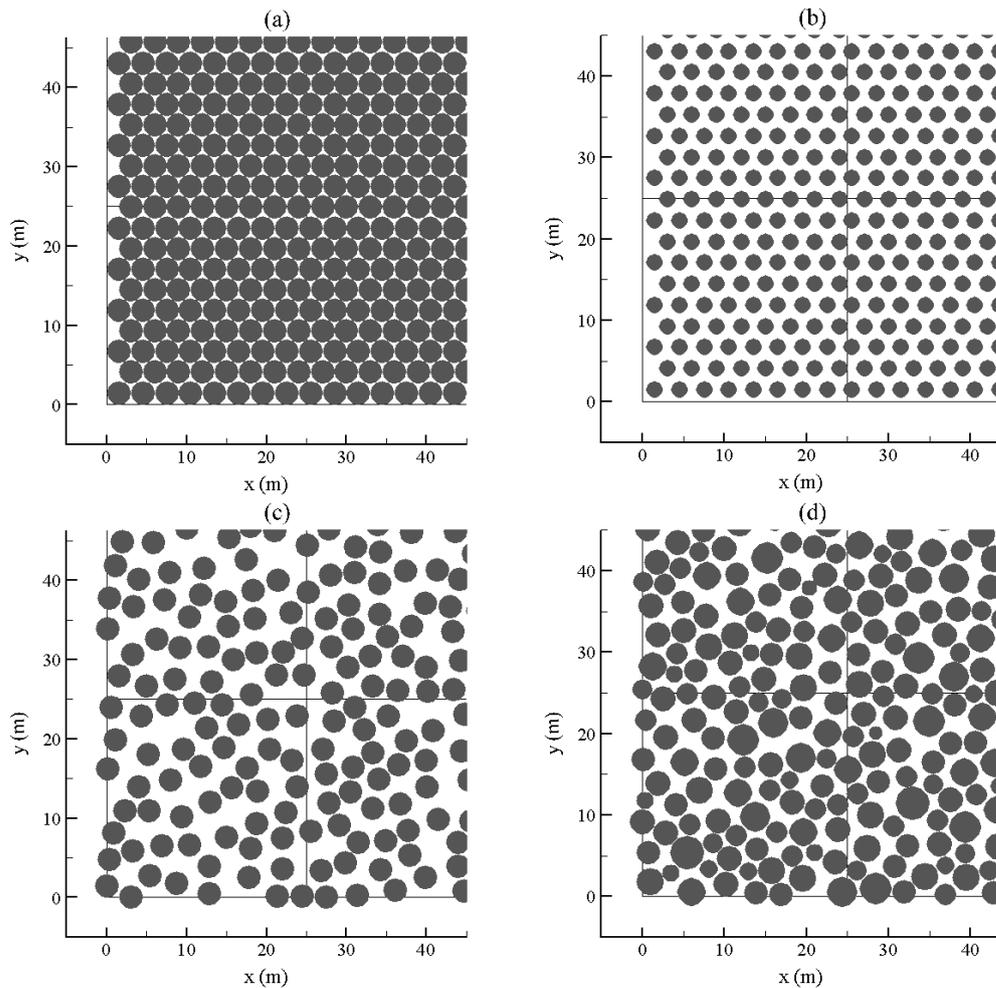


Figure 8 : Réseaux monodisperses « cristallins » de remplissages respectifs 0,91 (a) et 0,6 (b), réseau amorphe monodisperse généré à la volée, avec un taux de couverture de 0,525 (c), et réseau amorphe polydisperse de taux de remplissage 0,67 obtenu à partir d'une distribution normale de diamètre moyen 3 m et d'écart type 0,4 m (d).

2.2 Modèle thermique

La propagation d'un incendie de forêt est pilotée par les transferts de chaleur depuis les sites en feu vers les sites sains voisins (appelés par la suite sites récepteurs), mais aussi par les pertes thermiques de ces sites récepteurs vers l'environnement. Dans un précédent travail (Adou et al., 2010), nous avons supposé qu'un site récepteur pouvait accumuler de l'énergie au cours du temps jusqu'à atteindre une énergie critique pour laquelle l'inflammation du site a lieu. Ce critère simple ne permet pas de décrire correctement les échanges de chaleur, notamment le refroidissement radiatif du site récepteur vers l'ambiance, dans la mesure où la température du site n'est pas connue. A titre d'exemple, un site récepteur exposé longtemps à un feu qui se propage lentement pourra accumuler de l'énergie sans se refroidir par rayonnement vers

l'environnement, et dans certains cas s'enflammer, ce qui n'est pas toujours réaliste. C'est la raison pour laquelle nous utilisons un modèle thermique inspiré des travaux de Billaud et al. (2012). Il repose sur l'équation de conservation de l'énergie appliquée à chaque site récepteur, ce qui permet d'accéder à sa température et donc de bien évaluer les transferts de chaleur des sites en feu vers le site récepteur et du site récepteur vers l'environnement. Dans le modèle proposé, les échanges thermiques dominants sont considérés, à savoir la convection due aux gaz chauds poussés par le vent, y compris à l'intérieur de la strate végétale, et le rayonnement provenant des flammes situées au-dessus de la strate végétale et des braises du front de flammes, mais aussi le refroidissement radiatif des végétaux sains vers l'environnement.

2.2.1 Hypothèses du modèle

Le modèle thermique repose sur les hypothèses suivantes :

H1. Chaque site combustible j possède une forme cylindrique de hauteur H_j et de diamètre D_j . Son volume est donc $V_j = \pi D_j^2 H_j / 4$. Or, le volume élémentaire impliqué dans le préchauffage n'est pas le volume du site tout entier, mais plutôt celui de la couche supérieure du site de volume $V_j^{eff} = \pi D_j^2 \delta_j^{eff} / 4$, où $\delta_j^{eff} = \min(\delta_j; H_j)$ (Figure 9). Le terme δ_j est le libre parcours moyen radiatif au sein du milieu végétal, directement relié au rapport surface/volume des éléments fins de végétation, σ_j , et à leur fraction volumique, α_j , par la relation $\delta_j = 4 / \sigma_j \alpha_j$ (Butler, 1993; De Mestre et al., 1989). La valeur effective de δ_j doit être considérée dans la mesure où le libre parcours moyen ne peut excéder la hauteur du site végétal.

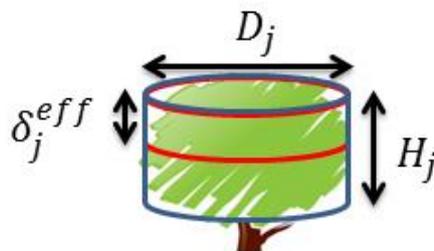


Figure 9 : Volume élémentaire du site végétal impliqué dans le processus de préchauffage.

H2. La propagation du feu est dominée par les éléments thermiquement fins (herbes, aiguilles de pins, feuillage des arbustes et des arbres, etc.), alors que les éléments plus épais, typiquement d'un diamètre supérieur à 6 mm, brûlent plus lentement à l'arrière du front de feu et ne participent pas à sa propagation (Rothermel, 1972 ; Luke et McArthur, 1977 ; Cohen et Finney, 2014).

H3. Comme c'est souvent le cas dans la modélisation des feux de végétaux, l'hypothèse d'un milieu thermiquement fin est adoptée, ce qui implique qu'il n'y a pas de différence de température dans le volume de contrôle V_j^{eff} . Cette hypothèse reste valable tant que δ_j^{eff} est petit devant la longueur de flamme.

H4. L'élévation en température d'un végétal fin et humide (tas : Wet Fine Fuel elements, noté par la suite WFF) étant assez complexe, la représentation la plus simple consiste à considérer trois étapes successives (Koo et al., 2005). Tout d'abord, le végétal sain humide exposé au front de flammes (région 1 sur la Figure 10) voit sa température augmenter jusqu'à atteindre 373 K. L'eau qu'il contient se vaporise à température constante (changement de phase) jusqu'à assèchement complet du végétal, ce qui revient à négliger l'évaporation à une température du végétal inférieure à la température d'ébullition de l'eau ; finalement, les éléments secs et fins (tas : Dry Fine Fuel elements, noté par la suite DFF) montent en température jusqu'à atteindre la température d'inflammation. Ce critère simple d'inflammation suppose en outre que le débit de pyrolyse est suffisant pour permettre l'inflammation du végétal. Les vapeurs combustibles produites se mélangent à l'air atmosphérique et brûlent en phase gazeuse pour former une flamme de diffusion dans la strate végétale et au-dessus de celle-ci (région 2 sur la Figure 10). En arrière du front de flammes, le débit de pyrolyse n'est plus suffisant pour entretenir la flamme. L'apport d'air dans cette zone favorise l'oxydation du résidu carbonneux des braises, conduisant à la formation de cendres. Dans la présente étude, nous avons négligé la contribution de la combustion exothermique du résidu carbonneux au processus de propagation. Les sites situés dans la région 3 sont donc considérés comme brûlés.

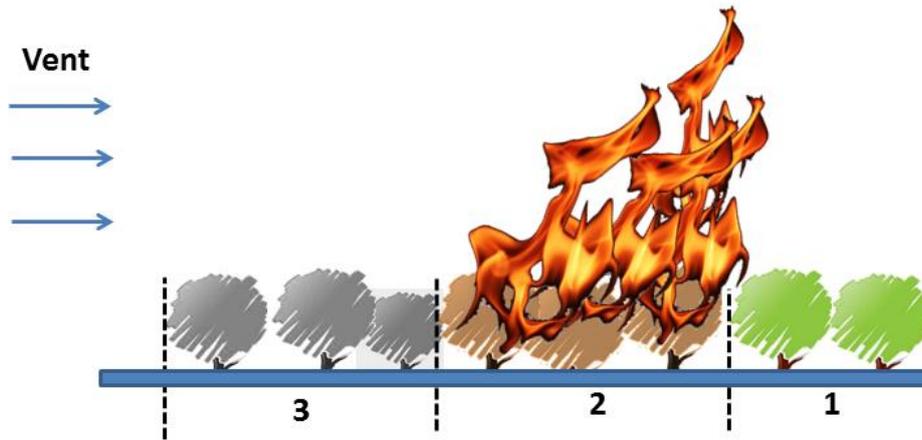


Figure 10 : Représentation schématique de la structure du front de feu. Région 1 : zone de préchauffage des sites combustibles sains ; région 2 : front de flammes composé des sites en feu; région 3 : sites brûlés.

H5. La combustion du résidu carbonneux étant négligée, on peut supposer que le volume de la phase solide reste constant au cours du processus de dégradation thermique. La fraction volumique solide du site j se déduit alors de sa charge par unité d'aire $m_j^{DFF''}$ et de la masse volumique des éléments secs et fins qui la constituent ρ_j^{DFF} par la relation suivante :

$$\alpha_j = \frac{m_j^{DFF''}}{\rho_j^{DFF} H_j}$$

H6. Les autres mécanismes de préchauffage comme la diffusion turbulente, la conduction en phases solide et gazeuse, ou encore l'énergie absorbée par la pyrolyse avant l'inflammation, sont négligeables. Pagni et Peterson (1973) soulignent que la contribution de ces mécanismes au processus de propagation est toujours négligeable, à l'exception de la conduction pour des scénarios de feu où la vitesse du vent est quasi nulle.

2.2.2 Equations générales

Le problème physique est représenté schématiquement sur la Figure 11, ainsi que les différents transferts thermiques mis en jeu. Les grandeurs q_{ij}^{rf} , q_{ij}^{rb} , q_{ij}^{ci} et q_{ij}^{cs} représentent respectivement les énergies par unité de temps et par unité de volume de la strate végétale reçues par le site j en provenance du site en feu i dues au rayonnement de la flamme, au rayonnement

des braises, à la convection des gaz chauds à l'intérieur de la strate et sur sa face supérieure. La grandeur q_j^{rl} représente la perte radiative du site j vers l'environnement. Ces différentes grandeurs sont détaillées ci-après.

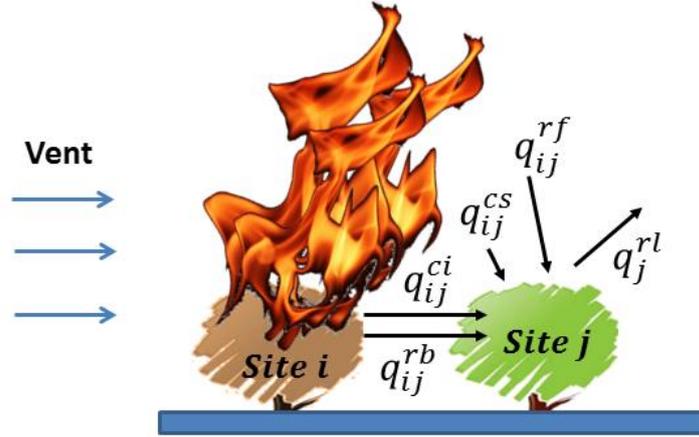


Figure 11 : Schéma des mécanismes impliqués dans la propagation du feu.

En vertu de l'hypothèse H4, le processus de dégradation se décompose en trois étapes pour lesquelles le principe de conservation de l'énergie appliqué au volume de contrôle V_j^{eff} d'un site j soumis à l'influence de N_{sf} sites en feu, peut s'appliquer :

- Echauffement du végétal humide ($T_j < 373K$) :

$$\alpha_j \rho_j^{WFF} \frac{d(c_p^{WFF} T_j)}{dt} = S_q \quad (1)$$

$$m_j^{eau''} = m_{0j}^{eau''} \quad (2)$$

- Dessiccation du végétal humide :

$$- \frac{L_{vap}^{eau}}{H_j} \frac{dm_j^{eau}}{dt} = S_q \quad (3)$$

$$T_j = 373K \quad (4)$$

- Echauffement du végétal sec ($373K < T_j < T_{ign}$) :

$$\alpha_j \rho_j^{DFE} \frac{d(c_p^{DFE} T_j)}{dt} = S_q \quad (5)$$

$$m_j^{eau''} = 0 \quad (6)$$

où T_j et $m_j^{eau''}$ sont respectivement la température et la masse d'eau par unité d'aire du site j .

Le terme S_q représente la somme des gains convectifs et radiatifs provenant des N_{sf} sites en feu diminuée des pertes radiatives du site récepteur vers l'environnement :

$$S_q = \sum_{i=1}^{N_{sf}} (q_{ij}^{rf} + q_{ij}^{rb} + q_{ij}^{ci} + q_{ij}^{cs}) - q_j^{rl} \quad (7)$$

La chaleur spécifique des éléments fins humides se déduit des masses volumiques et des chaleurs spécifiques des éléments fins secs et de l'eau qu'ils contiennent :

$$\rho_j^{WFF} c_p^{WFF} = \rho_j^{DFE} c_p^{DFE} + \rho_j^{DFE} Y^{eau} c_p^{eau} \quad (8)$$

Le terme Y^{eau} représente la teneur en eau (tas : Fuel Moisture Content, FMC), définie comme le rapport de la masse d'eau sur la masse de combustible sec (par exemple, un végétal qui contient autant d'eau que de matière sèche aura une teneur en eau de 1), de sorte que :

$$Y^{eau} = m_j^{eau} / m_{0j}^{DFE} (= m_j^{eau''} / m_{0j}^{DFE''}) \quad (9)$$

Contrairement aux études antérieures (Adou et al., 2010; Billaud et al., 2012), la chaleur spécifique des éléments fins secs varie ici avec la température du végétal. La relation linéaire de Parker (1989) est utilisée :

$$c_p^{DFE} = 1110 + 3.7T_j \quad (10)$$

Si l'introduction d'une dépendance de la chaleur spécifique en fonction de la température améliore la description du comportement thermique du site végétal, le calcul de la température n'est plus direct. La méthode itérative de Newton-Raphson est utilisée pour évaluer la température à partir de l'enthalpie déduite de l'équation (1) ou de l'équation (5).

2.2.3 Convection de surface

Le terme q_{ij}^{cs} correspond aux échanges convectifs entre les gaz chauds poussés par le vent en provenance du site en feu i et la face supérieure du site j . Comme l'ont souligné Beer and Enting (1990), la zone de flammes n'est pas une barrière impénétrable et, en raison d'effets

tridimensionnels, le vent peut y pénétrer. Ainsi, un site j situé dans le sillage d'un site en feu i peut être chauffé par convection. Ce préchauffage convectif dépend de la distance entre le site en feu et le site récepteur, d_{ij} . Pagni et Peterson (1973) propose une loi de décroissance exponentielle faisant apparaître une longueur caractéristique d'environ trois fois la longueur de flamme :

$$q_{ij}^{cs} = \frac{h^{cs}}{\delta_j^{eff}} (T_i^f - T_j) \exp\left(-\frac{d_{ij}}{3.33L_i^f}\right) \quad (11)$$

où L_i^f et T_i^f sont la longueur et la température de la flamme du site i .

Le coefficient h^{cs} , utilisé pour décrire le transfert convectif sur la face supérieure des sites récepteurs, est celui déterminé pour un écoulement turbulent sur une plaque plane (Incropera et De Witt, 1985) :

$$h^{cs} = 0.037 \frac{k_{T_{\infty,f}}}{d_{ij}} \left(\frac{U_j^t d_{ij}}{\nu_{T_{\infty,f}}}\right)^{0.8} Pr^{1/3} \quad (12)$$

où U_j^t est la composante tangentielle de la vitesse du vent local calculée au sommet du site j . Pr est le nombre de Prandtl, $k_{T_{\infty,f}}$ et $\nu_{T_{\infty,f}}$ sont la conductivité thermique et la viscosité cinématique de l'air évaluées à la température moyenne entre la flamme et l'environnement. Cette approximation « plaque plane » peut être raisonnablement appliquée dès lors que les sites végétaux ne sont pas trop distants les uns des autres.

Le gain convectif donné par la relation (11) doit cependant être doublement corrigé.

La première correction s'applique lorsque le site récepteur n'est pas intégralement contenu dans le sillage du site en feu (Figure 12). Lorsque le réseau est monodisperse, un calcul géométrique simple permet d'évaluer la proportion du site j , X_{ij} , qui se trouve dans le sillage du site i . Dans le cas contraire, le calcul géométrique devient beaucoup plus complexe. On simule alors la convection par l'émission collimatée de quanta, dans la direction du vent, depuis le site en feu, le point d'émission étant généré aléatoirement. Le rapport du nombre de quanta reçus par le site récepteur sur le nombre de quanta émis détermine la valeur de X_{ij} .

La seconde correction s'applique lorsqu'un site en feu k se trouve entre le site émetteur i et le site récepteur j (Figure 12). Pour un réseau polydisperse, des quanta convectifs sont émis depuis le site en feu. S'ils sont interceptés par le site k , ils sont alors considérés comme perdus et ne contribuent pas au gain convectif du site j . Comme précédemment, si le réseau est

monodisperse, l'écrantage dû au site en feu k est évalué par de simples considérations géométriques.

Ces corrections doivent être calculées à chaque étape de temps et pour tous les voisins de chaque site en feu. Dans la pratique, afin de réduire l'effort de calcul, on limite le voisinage convectif d'un site en feu à dix fois la longueur de flamme. A cette distance, un site récepteur reçoit moins de 3,6% (*i.e.* $\exp(-10/3.33)$) du préchauffage convectif provenant du site en feu.

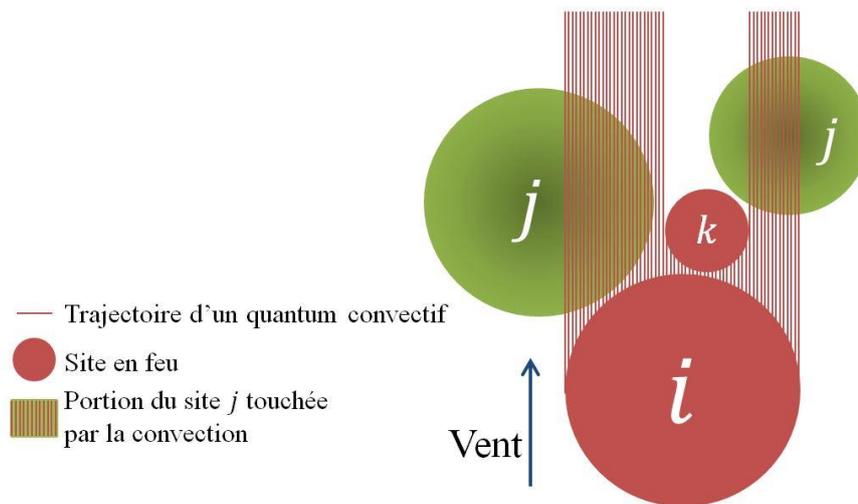


Figure 12 : Illustration de l'émission de quanta convectifs depuis le site en feu i et reçus par les sites récepteurs j situés dans son sillage et de l'effet de l'écrantage dû au site en feu k .

2.2.4 Convection à l'intérieur de la strate végétale

Lorsque la strate végétale est suffisamment poreuse et sous l'action du vent, l'air peut s'engouffrer dans la strate végétale en flamme, s'échauffer au contact des braises et contribuer de façon non négligeable au préchauffage des sites sains. En s'inspirant des travaux de Koo et al. (2005), le transfert convectif dû aux braises peut s'écrire :

$$q_{ij}^{ci} = \frac{4}{\delta_j} h^{ci} (T_i^b - T_j) \exp\left(-\frac{d_{ij}}{\delta_j}\right) \quad (13)$$

A noter que la longueur caractéristique qui apparaît dans l'équation (13) est δ_j , et non δ_j^{eff} , car la convection dans la strate végétale, parallèlement au terrain, n'est pas limitée par sa hauteur.

Pour déterminer le coefficient convectif h^{ci} , on suppose que le milieu végétal est constitué, faute de mieux, de particules cylindriques qui représentent les branches, les aiguilles ou les brins d'herbes. La porosité du milieu végétal est suffisamment élevée pour considérer que l'échange ne se fait que sur un cylindre plutôt que sur un ensemble de cylindres (Koo et al., 2005). On utilise ainsi la corrélation caractérisant l'échange convectif pour un cylindre placé dans un écoulement transverse (Incropera et De Witt, 1996) :

$$h^{ci} = 0.911 \frac{k_{T_{\infty,f}}}{D_j^{FF}} \left(\frac{U_j^t D_j^{FF}}{\nu_{T_{\infty,f}}} \right)^{0.385} Pr^{1/3} \quad (14)$$

où U_j^t est la vitesse tangentielle locale du vent à mi-hauteur du volume élémentaire V_j^{eff} attaché au site j , et D_j^{FF} représente le diamètre des éléments fins, supposés cylindriques, du site j .

Comme dans le paragraphe précédent, le gain convectif à l'intérieur de la strate végétale est calculé par l'émission collimatée de quanta dans le sillage du site en feu i et doublement corrigé après évaluation de la proportion du site récepteur j qui se trouve réellement dans le sillage et application de l'écrantage par d'éventuels sites en feu entre les sites i et j .

2.2.5 Rayonnement des flammes

Le calcul du rayonnement de la flamme combine un modèle de flamme solide, qui décrit la flamme visible comme un solide de forme géométrique simple, et une méthode de Monte Carlo (Adou et al., 2010 ; Billaud et al., 2011).

Bien que certains travaux utilisent le concept d'émission volumique du rayonnement de la flamme (Collin et al., 2012 ; Marchand, 2016), une approche plus simple, basée sur l'émission surfacique, est ici utilisée.

Dans le présent travail, on assimile la flamme à un cylindre dont seule l'enveloppe émet du rayonnement.

Ce modèle radiatif, relativement simple, nécessite l'estimation de certaines propriétés de la flamme : sa longueur L_i^f , son diamètre D_i^f (ici $D_i^f = D_i$), son angle d'inclinaison θ_i^f , et son pouvoir émissif $P_i^{f''}$.

La méthode de Monte Carlo consiste à lancer N_i quanta radiatifs depuis la surface latérale de flamme $S_i^f = \pi D_i L_i^f$ et à suivre ces quanta pour déterminer ceux, notés N_{ij} , qui ont atteint le site végétal j . Chaque quantum est indivisible et supposé transporter une certaine quantité d'énergie par unité de temps q_0 (en W) :

$$q_0 = \frac{P_i^{f''} S_i^f}{N_i} = \frac{P_i^f}{N_i} \quad (15)$$

où $P_i^f = P_i^{f''} S_i^f$ est la puissance radiative de la flamme.

Le gain radiatif du site j exposé au site en feu peut s'écrire de la façon suivante :

$$q_{ij}^{rf} = \frac{a_j q_0 N_{ij}}{V_j^{eff}} \quad (16)$$

A noter que le terme $F_{ij} = N_{ij}/N_i$ représente le facteur de vue entre la flamme et la surface du site j .

Ce gain radiatif subit deux corrections :

- *Première correction* : un quantum émis depuis le site i qui intercepte un site en feu k , ou la flamme qui le surplombe, avant de toucher le site récepteur j , est considéré comme perdu.
- *Deuxième correction* : le rayonnement est atténué par la couche d'air atmosphérique entre le site en feu et le site récepteur. La transmittance τ_{ij} de la couche d'air est déterminée par le modèle SNB de Malkmus (Collin, 2006 ; Billaud, 2011) en fonction de la température équivalent corps noir de la source, de l'épaisseur d_{ij} et de l'humidité

relative de la couche d'air. On montre (Drissi, 2013) que, pour une température d'émission donnée, elle peut se mettre sous la forme : $\tau_{ij} = a + bd_{ij}^c$, où a, b et c sont des coefficients qui dépendent de l'humidité relative. Il suffit alors de générer une base de données de ces coefficients pour une large gamme de températures d'émission et d'humidités relatives pour en déduire la transmittance en fonction de la distance entre sites.

Les méthodes utilisées pour le calcul de l'intersection, entre les quanta émis et la strate végétale ou une flamme, sont détaillés en annexe 1.

La méthode de Monte Carlo est relativement simple et particulièrement bien adaptées aux configurations géométriques complexes rencontrées. Elle s'avère néanmoins coûteuse en temps de calcul en raison du nombre élevé de quanta à émettre par unité de surface de flamme pour obtenir une solution précise (par exemple, 10^5 quanta dans Adou et al. (2010)).

Dans le cadre de cette thèse, dont l'objectif est d'élaborer un outil « temps réel » pour la simulation des grands incendies, une méthode de pré-calcul des facteurs de vue F_{ij} a été développée pour réduire de manière considérable le temps de calcul du rayonnement. Elle est présentée dans le paragraphe 3.1.

2.2.6 Rayonnement des braises

Les braises situées dans la zone de flammes perdent de l'énergie sous forme de rayonnement, ce qui peut contribuer au préchauffage des sites sains environnants, d'autant plus que le milieu végétal présente une grande porosité.

L'énergie radiative émise par les braises est définie en termes de transmittance du milieu végétal τ et de pouvoir émissif des braises $P^{b''}$ comme suit (Hottel et al., 1965) :

$$q^{rb} = P^{b''} \left(-\frac{d\tau}{dx} \right) \quad (17)$$

Sachant que la transmittance du rayonnement sur une longueur x dans un milieu de particules végétales disposées aléatoirement est donnée par :

$$\tau = \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (18)$$

où δ est le libre parcours moyen radiatif au sein du milieu végétal (voir hypothèse H1), il vient :

$$q^{rb} = \frac{1}{\delta} P^{b''} \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (19)$$

Si l'on applique ce raisonnement au réseau de sites, le gain radiatif reçu par un site j et provenant d'un site en feu i décroît de manière exponentielle avec la distance qui les sépare d_{ij} :

$$q_{ij}^{rb} = \frac{1}{\delta_j} P_i^{b''} \exp\left(-\frac{d_{ij}}{\delta_j}\right) \quad (20)$$

où $P_i^{b''}$ est le pouvoir émissif des braises du site i qui s'exprime en fonction de leur émissivité ε_i^b et de leur température T_{bi} de la façon suivante :

$$P_i^{b''} = \varepsilon_i^b \sigma T_{bi}^4 \quad (21)$$

2.2.7 Pertes radiatives d'un site récepteur

Exposé au front de flammes, un site récepteur voit sa température augmenter. Dès lors qu'il s'échauffe, ce site va, de façon concomitante, se refroidir en cédant de l'énergie sous forme de rayonnement vers l'environnement. En supposant que ce refroidissement radiatif se fait préférentiellement par la face supérieure du site, la perte thermique correspondante peut s'écrire de la manière suivante :

$$q_j^{rl} = \frac{1}{\delta_j^{eff}} \varepsilon_j \sigma (T_j^4 - T_\infty^4) \quad (22)$$

où ε_j est l'émissivité du site végétal et T_∞ la température de l'environnement.

2.3 Données d'entrée et paramètres du modèle

Les données d'entrée du modèle sont les suivantes :

- ✓ un modèle numérique de terrain (MNT) qui correspond à une représentation sous forme numérique du relief de la zone géographique d'étude.

Le MNT utilisé correspond à un maillage régulier carré (raster) et fournit les coordonnées (x, y, z) des points du maillage. L'altitude de chaque site végétal du réseau est obtenue par interpolation bilinéaire des altitudes des sommets du pavé MNT sur lequel il se trouve.

- ✓ La carte d'occupation des sols et le taux de couverture végétale, c'est-à-dire la proportion du terrain couverte par la végétation.
- ✓ Les conditions météorologiques concernant le vent, l'humidité relative de l'air et la température ambiante, fournies par une station météo proche du lieu de l'incendie.

La vitesse et la direction moyenne du vent sont ensuite utilisées pour déterminer les conditions locales de vent. Dans le cadre du projet TECHFORFIRE, NOVELTIS fournit au modèle une prévision actualisée toutes les heures, par la combinaison d'un modèle WRF à 2 km de résolution (Kioutsioukis et al., 2016) et d'une descente en échelle par le module météo CALMET (Scire, 2000), en tenant compte du relief et de la rugosité des différents types de terrain (Silva, 2007). La résolution du vent local est de deux fois la résolution du MNT, soit 60 m pour un MNT à 30 m.

- ✓ Une base de combustibles végétaux donnant à chaque site, suivant la typologie de la végétation qui le compose, les propriétés suivantes :
 - hauteur et diamètre du site cylindrique ;
 - émissivité du milieu végétal ;
 - absorptivité du milieu végétal ;
 - rapport surface-volume des éléments fins ;
 - masse par unité d'aire des éléments secs et fins ;
 - masse par unité d'aire d'eau des éléments secs et humides ;
 - masse volumique des éléments fins ;
 - temps de résidence de flamme ;
 - chaleur de combustion des volatils ;
 - température d'inflammation ;
 - émissivité des braises ;
 - température des braises ;
 - fraction radiative de la puissance libérée par la combustion.

En ce qui concerne les paramètres du modèle, leur détermination utilise certaines hypothèses simplificatrices et des corrélations empiriques de la littérature. L'organigramme donné sur la Figure 13 illustre la procédure de calcul de ces paramètres.

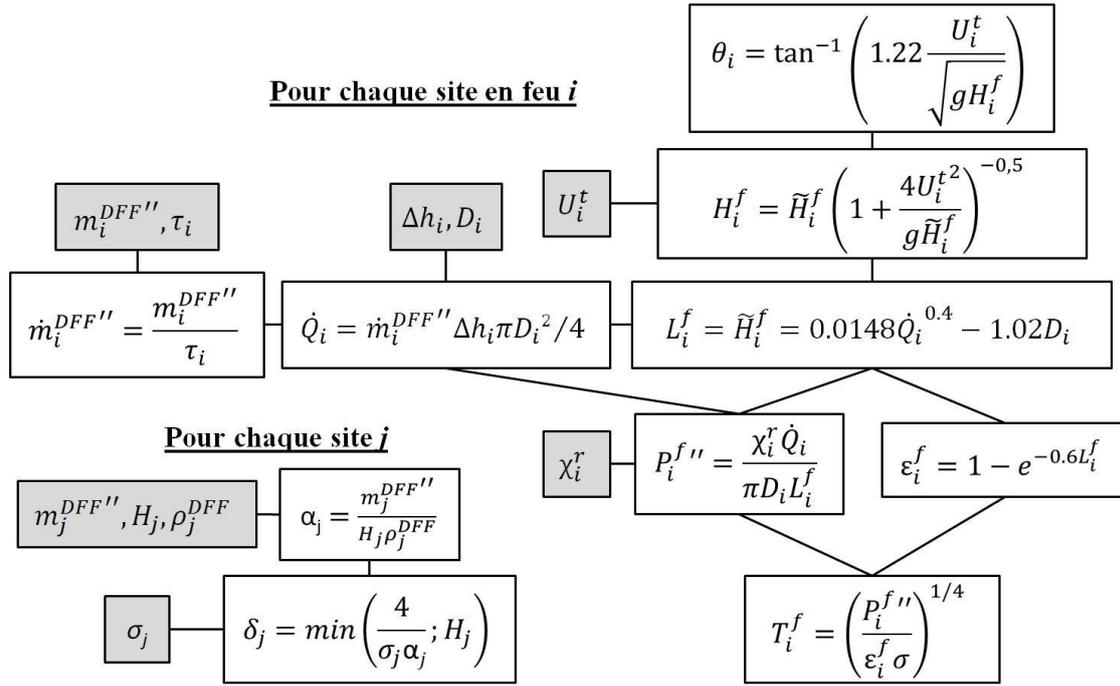


Figure 13: Organigramme du calcul des paramètres du modèle.

Le débit de pyrolyse surfacique, qui est à la base du calcul des propriétés de flamme, est calculé comme le rapport entre la masse d'éléments fins par unité d'aire au sol et le temps de combustion (Mell et al., 2009 ; Billaud, 2011) :

$$\dot{m}_i^{DFP''} = \frac{m_i^{DFP''}}{\tau_i} \quad (23)$$

Cette approximation traduit l'hypothèse que la pyrolyse se fait à débit constant durant τ_i , ce qui revient à approcher la courbe d'évolution du débit de pyrolyse par une fonction « porte » (Figure 14). Elle permet de calculer le débit de pyrolyse, et donc les propriétés de flamme, une seule fois par site combustible, dès qu'il s'enflamme. L'introduction d'un débit variable au cours du temps nécessiterait de calculer ces propriétés à chaque étape de temps.

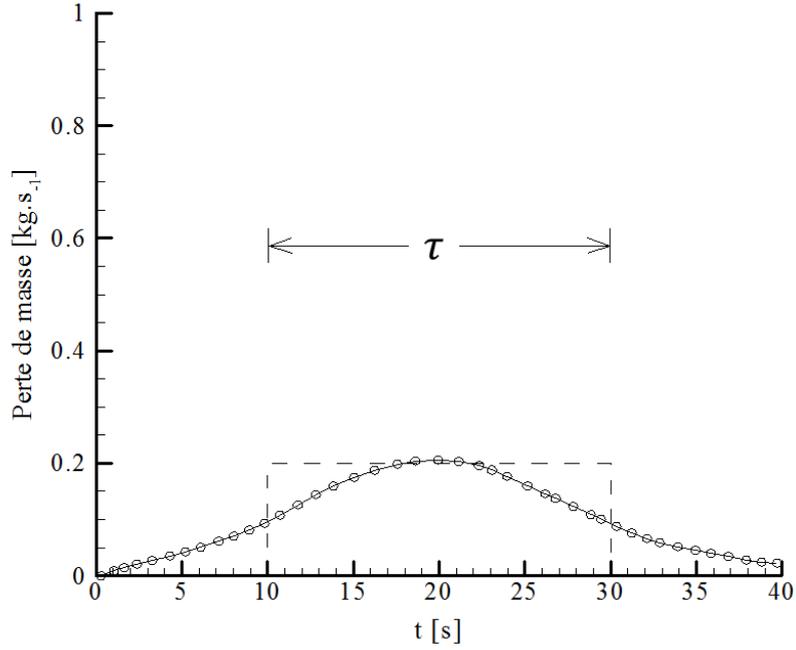


Figure 14 : Evolution au cours du temps de la perte de masse mesurée par le NIST lors de la combustion de pins Douglas (Mell et al., 2009). En trait pointillé, le débit masse est supposé constant pendant le temps de combustion avec flamme, τ .

Cette approximation permet de calculer la puissance de la flamme (tas : Heat Release Rate, HRR) comme le produit du débit de pyrolyse surfacique par la chaleur de combustion des gaz volatils et l'aire de la base du site i :

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_i^{DF} \Delta h_i \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (24)$$

En supposant que la longueur de flamme n'est que faiblement influencée par le vent (Thomas et Pickard, 1961 et Thomas, 1963 ; Nmira et al., 2010), elle est prise constante et égale à la hauteur de flamme visible sans vent, donnée par la corrélation d'Heskestad (1983) :

$$L_i^f = \tilde{H}_i^f = 0.0148 \dot{Q}_i^{0.4} - 1.02 D_i \quad (25)$$

Pour déterminer l'inclinaison de la flamme, Albini (1981) propose d'évaluer l'angle entre la flamme inclinée et la verticale de la façon suivante :

$$\tan \theta_i = 1.22 \frac{U_i^t}{\sqrt{g H_i^f}} \quad (26)$$

où U_i^t est la vitesse du vent à mi-hauteur de flamme et H_i^f la hauteur de la flamme inclinée par le vent issue de la corrélation de Putnam (1965) :

$$H_i^f = \tilde{H}_i^f \left(1 + 4 \frac{U_i^{t2}}{g\tilde{H}_i^f} \right)^{-0.5} \quad (27)$$

Comme le montre l'organigramme de la Figure 13, l'équation ci-dessus ne sert en fait qu'à calculer l'angle d'inclinaison de la flamme. Elle n'est pas utilisée comme paramètre par le modèle.

La pouvoir émissif de la flamme peut être calculé en utilisant un coefficient global représentant la fraction de la puissance libérée par la combustion perdue par rayonnement (Markstein, 1984) :

$$P_i^{f''} = \chi_i^r \frac{\dot{Q}_i}{\pi D_i L_i^f} \quad (28)$$

En faisant l'hypothèse que la flamme est un corps gris, la température de la flamme peut être déduite du pouvoir émissif :

$$T_i^{f^4} = P_i^{f''} / (\varepsilon_i^f \sigma) \quad (29)$$

L'émissivité de la flamme ε_i^f est une fonction de l'émissivité du gaz et de celle des particules de suies (Bard et Pagni, 1985). En utilisant les propriétés des suies émises par la combustion du bois, qu'on suppose proches de celles des matières végétales forestières, obtenues expérimentalement par Bard et Pagni (1985), l'émissivité de la flamme peut être exprimée en fonction de la longueur de flamme et d'un coefficient total d'absorption, pris égal à 0.6 m^{-1} :

$$\varepsilon_i^f = 1 - e^{-0.6L_i^f} \quad (30)$$

2.4 Exemple de validation du modèle de propagation

Très régulièrement cité et utilisé comme cas de référence pour la validation des modèles de propagation d'incendies de forêt (Mell et al., 2005, 2007 ; Sullivan, 2007), le brûlage dirigé

F19 est l'un des quelques 121 brûlages effectués en 1986 par l'équipe de Phil Cheney. Il couvrait un domaine de 200 m × 200 m. La végétation, homogène et continue, était composée presque exclusivement de *Themeda Australis* (tas : kangaroo grass), une herbe fine avec un rapport surface/volume de 12240 m⁻¹. La direction et la vitesse du vent ont été mesurées aux quatre coins du domaine à une hauteur de 2 m au-dessus du sol, toutes les 5 s durant le feu.

L'allumage a été effectué par deux pompiers partis au même instant du milieu du côté gauche perpendiculairement à la direction du vent moyen pour parcourir chacun une distance de 87.5 m en un temps de 56 s (Figure 15).

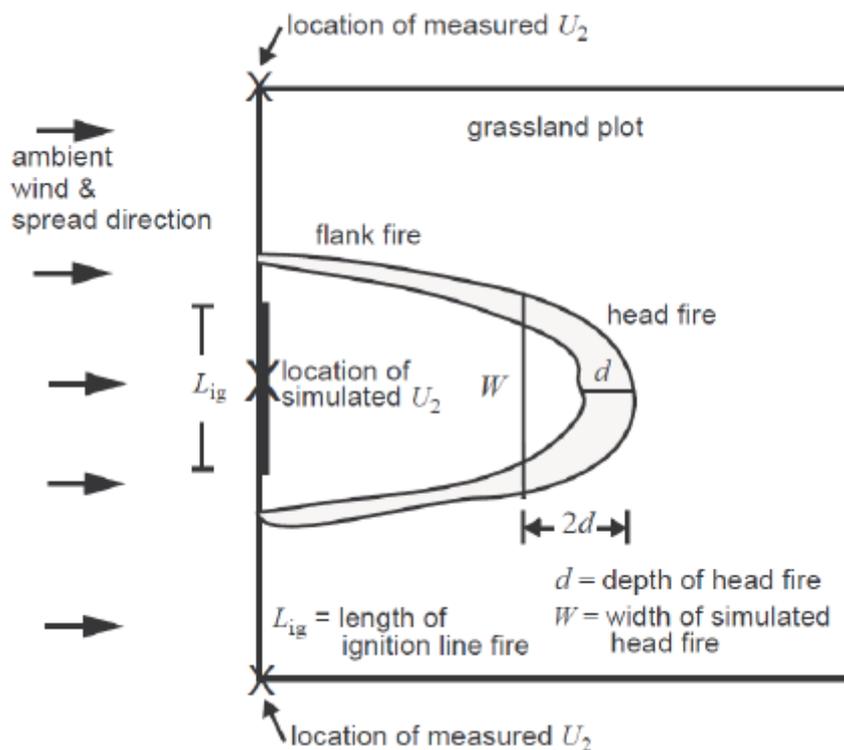


Figure 15 : Brûlage dirigé F19 : Représentation schématique des conditions d'allumage et du front du feu, extraite de Mell et al. (2007).

Pour représenter la végétation, un réseau cristallin monodisperse, avec un taux de remplissage maximal de 0,91, est utilisé. Chaque site est représenté par un cylindre de 2,54 m de diamètre, ce qui donne, d'après Heskestad (1983), une hauteur de flamme de 2,6 m, comme cela a été observé expérimentalement.

Pour ce cas très bien documenté (Cheney et al., 1993, 1998), certains paramètres sont relativement bien connus (Tableau 2). Pour d'autres, nous avons utilisé des valeurs

représentatives issues de la littérature. Pour cette simulation, le pas de temps retenu est de 0,2 s. Nous étudierons l'influence de ce paramètre numérique sur la solution au paragraphe suivant.

On dispose comme éléments de comparaison entre le modèle et l'expérience de deux contours mesurés, l'un après 56 s de feu, l'autre après 86 s (Figure 16). Un changement soudain de la direction du vent rend la comparaison non pertinente après 86 s de propagation (Mell et al., 2007).

Tableau 2 : Paramètres utilisés pour la simulation du brûlage dirigé F19 de Cheney et al. (1993, 1998).

Pour la température des braises, on suppose qu'elles sont en équilibre thermique avec la flamme.

	Valeur utilisée	Source
U (m/s) (à 2 m du sol)	4,83	Cheney et al. (1993, 1998)
T_{∞} (K)	307	
RH (%)	20	
H (m)	0,51	
$m^{DFF''}$ (kg/m ²)	0,313	
$m^{eau''}$ (kg/m ²)	0,0182	
ρ^{DFF} (kg/m ³)	512	
σ (1/m)	12240	
ε	0,9	supposé
a	0,8	Pagni et Peterson (1973)
τ (s)	6,2	déduit de la corrélation d'Anderson (1970) : $\tau = 75600/\sigma$
Δh (MJ/kg)	14,454	Susott (1982) Hough (1969)
T_{ign} (K)	561	Pagni et Peterson (1973) Koo et al. (2005)
χ^r	0,35	bûcher de bois (Quintiere, 1997)
T^b (K)	T^f	supposé



Figure 16 : Photographies aériennes du front de feu après 56 et 86s de propagation pour le brûlage dirigé F19 (Cheney et al., 1993, 1998).

Sur la Figure 17, nous avons comparé les contours prédits par le modèle (noté MMC) à ceux observés expérimentalement, montrant un bon accord général.

La vitesse du front de tête est légèrement surestimée, d'environ 5% à $t = 56$ s (1,41 vs 1,38 m/s) et 8% à $t = 86$ s (1,43 vs. 1,36 m/s). La surface brûlée est quant à elle bien reproduite avec une erreur inférieure à 3% à $t = 56$ s (0,80 vs. 0,82 ha) et $t = 86$ s (1,70 vs. 1,73 ha). Cependant, malgré ce bon agrément qualitatif, on observe des différences entre la forme du front expérimental et celle de la simulation. Des changements dans la vitesse et la direction du vent se sont produits au cours de ce brûlage, rompant la symétrie du front de flamme, ce qui n'est pas le cas dans la simulation qui fait l'hypothèse de conditions de vent constantes tout au long de l'essai.

Tableau 3 : Temps CPU et allocation mémoire requis pour simuler 86 s du brûlage dirigé de Cheney et al. avec le modèle de propagation utilisant la méthode de Monte Carlo. Toutes les simulations ont été réalisées sur un seul processeur de type Intel® Xeon® CPU E5-2643 cadencé à 3.30 GHz.

Contours	Cheney et al.		MMC	
	ros (m/s)	Surface brûlée (ha)	ros (m/s)	Surface brûlée (ha)
56 s	1,38	0,82	1,53	0,86
86 s	1,36	1,73	1,53	1,84

Un autre excellent indicateur du comportement du feu est l'épaisseur du front de flamme, qui peut s'exprimer comme le produit de la vitesse de propagation et du temps de résidence de flamme ($d = ros \times \tau$). Le modèle donne environ 9,2 m contre 10 m pour l'expérience. On peut également noter que les valeurs de la vitesse moyenne de propagation du feu, calculée entre 56 et 86 s, et de l'épaisseur du front expérimentales donnent un temps moyen de résidence de flamme de 7,6 s, ce qui est légèrement supérieur à la valeur donnée par la formule d'Anderson, 6,2 s.

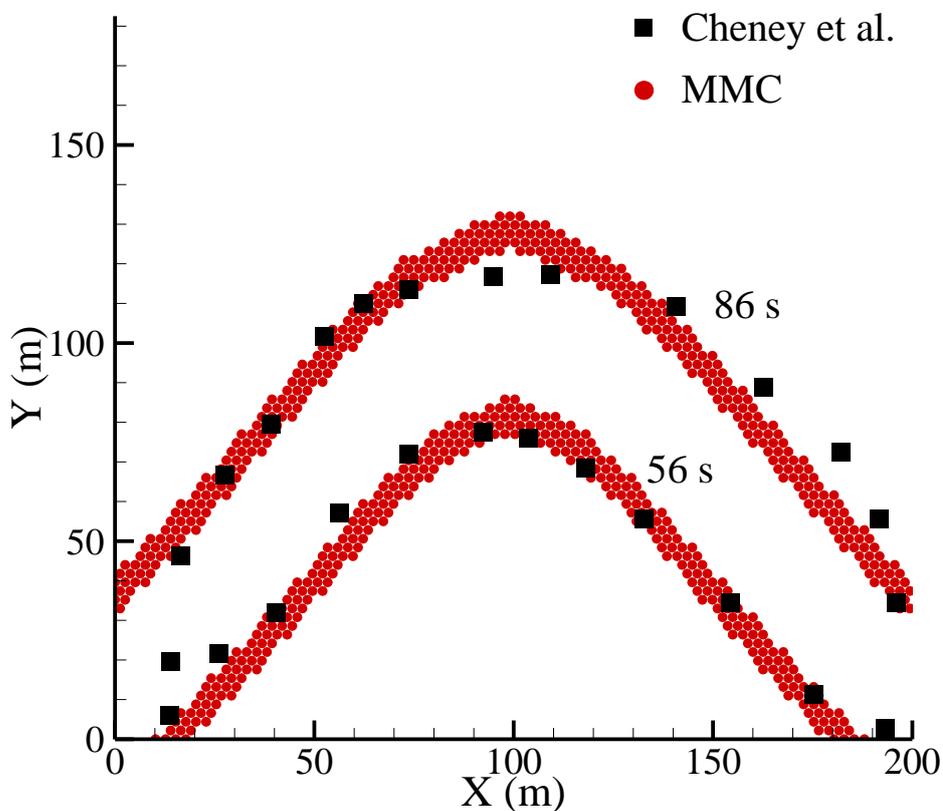


Figure 17 : Comparaison entre les résultats expérimentaux (symboles) et la simulation (en rouge) du feu F19 de Cheney. Sont affichés les instantanés de la propagation à 56 et 86 secondes.

2.5 Influence de certains paramètres sur la solution

Le modèle de propagation proposé repose sur la méthode stochastique de Monte Carlo pour le calcul du rayonnement des flammes et, lorsque le milieu est polydisperse, pour le calcul de la convection en surface et à l'intérieur de la strate. Contrairement au modèle déterministe pour qui une même cause produira les mêmes effets, un modèle stochastique donnera, pour les mêmes intrants, une solution différente à chaque exécution. Il faut donc exécuter un certain nombre de runs pour déterminer une solution moyenne correcte. Le nombre de quanta radiatifs et convectifs utilisés pour la méthode de Monte Carlo est également un paramètre déterminant qui conditionne la qualité de la solution : l'erreur commise en approximant la valeur moyenne d'une variable aléatoire (par exemple, le flux reçu par un site sain de la part d'un site en feu) par celle obtenue après avoir lancé N quanta est d'autant plus faible que N est grand et que l'écart type du phénomène physique simulé est petit⁵. Dans la pratique, on limite néanmoins le nombre de quanta, et par conséquent le temps de calcul, en fixant une tolérance relative inférieure à 2 à 3%. L'optimisation de ce compromis dépend du scénario de feu. Le cas expérimental de Cheney et al. (1993, 1998) est utilisé comme cas de référence pour étudier l'influence du nombre de runs et du nombre de quanta radiatifs sur la propagation, en termes de contours de feu à 56 et 86 s, et sur le temps CPU nécessaires à leur simulation. La végétation étant monodisperse, de simples considérations géométriques suffisent au calcul de la convection de surface et à l'intérieur de la strate, ce qui limite l'utilisation de la méthode de Monte Carlo au seul rayonnement des flammes.

Le cas de Cheney et al. est aussi utilisé pour trouver le pas de temps qui conduit au meilleur compromis entre temps de calcul et précision de la solution.

2.5.1 Nombre de quanta par unité de surface de flamme

La nature stochastique de la méthode de Monte Carlo fait qu'il est très complexe, voire impossible, de déterminer *a priori* le nombre optimal de quanta à lancer afin de représenter précisément et, sans trop pénaliser le temps de calcul, l'émission radiative des flammes. Nous avons donc réalisé des expérimentations numériques en faisant varier le nombre de quanta par unité de surface de flamme de 100 à 1000 et nous avons comparé les résultats obtenus pour les contours de feu à 56 et 86 s (Figure 18). Un pas de temps de 0,1 s a été utilisé pour ces simulations.

⁵ L'erreur type de la moyenne est égale à σ/\sqrt{N} où σ est l'écart type du phénomène physique considéré et N le nombre de quanta utilisés. Ce qui signifie qu'un phénomène de grand écart type nécessitera un grand nombre de quanta pour que sa moyenne soit correctement calculée.

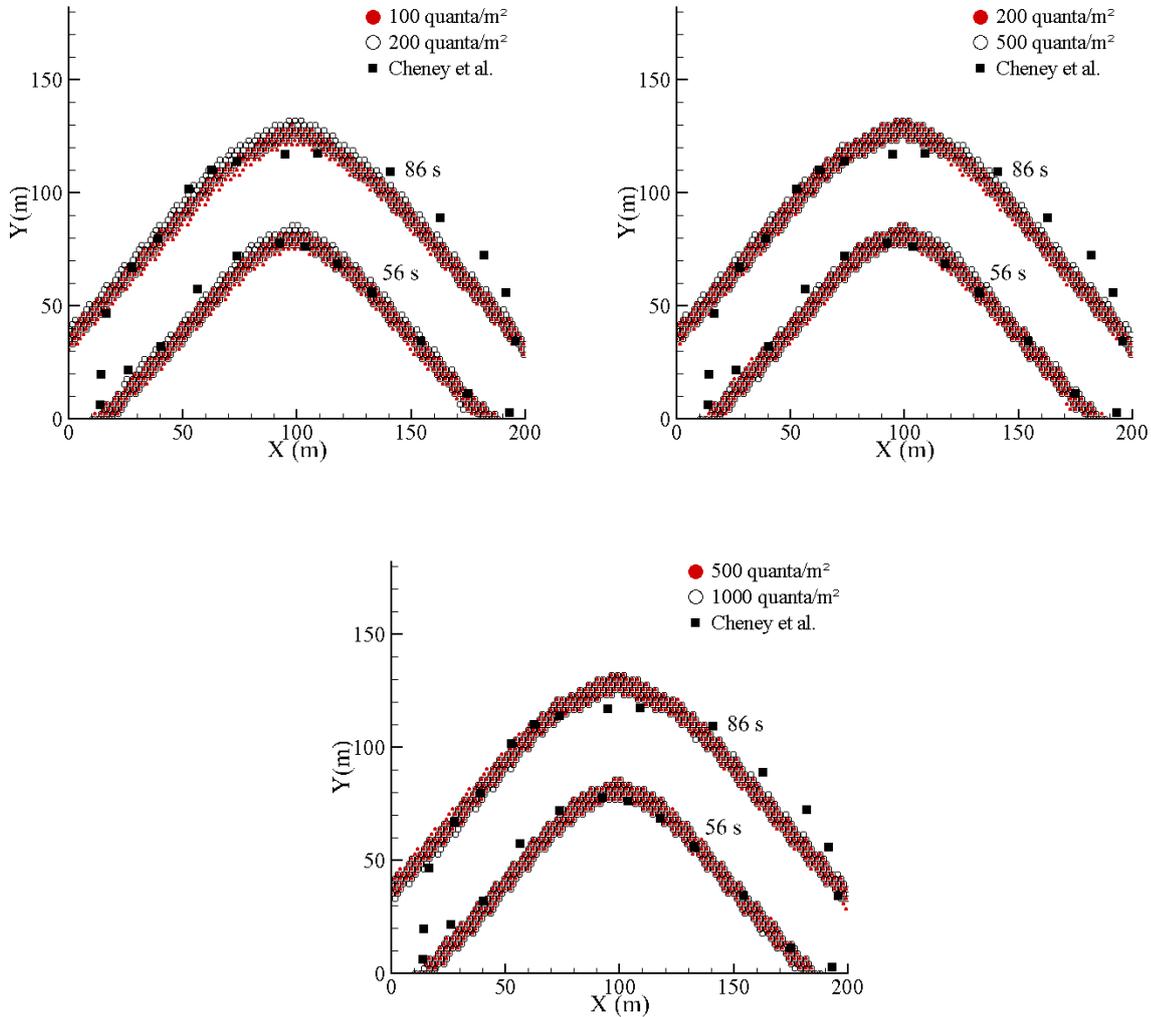


Figure 18 : Comparaison des simulations effectuées avec les différentes densités de quanta d'émission sélectionnées, pour un pas de temps de 0,1 s.

Il est clairement visible que les contours prédits avec 200, 500 et 1000 quanta/m² sont très proches les uns des autres. En revanche, en utilisant 100 quanta par mètre carré de flamme, la vitesse de propagation est légèrement sous-évaluée. L'explication vient du fait qu'avec 100 quanta/m² le rayonnement reçu par les zones les plus éloignées du front de flamme est très « bruité » et généralement sous-estimé, ce qui pénalise le préchauffage radiatif des sites sains. Ce constat est confirmé par les écarts relatifs sur la vitesse de propagation, ainsi que sur les surfaces en feu et brûlées, donnés dans le Tableau 4, en prenant comme cas de référence la simulation utilisant 1000 quanta/m².

On constate sur le Tableau 5 que le temps de simulation est pratiquement proportionnel au nombre de quanta émis. Par exemple, en multipliant par 10 le nombre de quanta et pour un pas de temps de 0,1 s, le temps de calcul est 11,7 fois plus grand. Enfin, en rapprochant le Tableau 4 et le Tableau 5, il semble que le meilleur compromis, en termes d'effort de calcul et de qualité de la solution, soit d'utiliser 200 quanta/m² puisque les écarts relatifs par rapport au cas de référence sont inférieurs à 2% pour un temps CPU divisé par 5.

Tableau 4 : écarts relatifs (en %) des vitesses de propagation (ROS), surfaces en feu (FEU) et surfaces brûlées (BRU) par rapport à la simulation de référence (1000 quanta/m² et pas de temps de 0.1s).

Pas de temps (s)	0,1			0,2			0,5			1			
	Quanta/m ²	ROS	FEU	BRU	ROS	FEU	BRU	ROS	FEU	BRU	ROS	FEU	BRU
100		-3,3	-2,1	-2,2	-3,3	-4,6	-2,9	-9,4	0,5	-4,8	-6,6	2,6	-10,2
200		-1,6	-0,5	-0,2	-1,6	-2,1	-0,5	-6,9	-4,6	-2,1	-6,6	5,1	-7,6
500		1,6	1,5	1,9	-1,6	0,0	0,6	-6,9	-4,6	-1,9	-6,6	5,1	-5,6
1000		0,0	0,0	0,0	-1,6	-1,5	0,3	-6,9	-4,6	-2,0	-6,6	5,6	-6,0

Tableau 5 : Influence du nombre de quanta émis par unité de surface de flamme et du pas de temps sur le temps de simulation du cas de Cheney et al.. La durée du feu simulée est de 86s.

Pas de temps (seconde)	Nombre de quanta lancés par unité de surface (quanta/m ²)			
	1000	500	200	100
0.1	68868	36970	13103	5904
0.2	35029	18412	6684	3000
0.5	13360	6883	2831	1281
1	7171	3629	1465	664

2.5.2 Pas de temps

La propagation d'un incendie de forêt est un processus instationnaire pour lequel le choix du pas d'intégration en temps est crucial. En particulier, la phase de dégradation thermique d'un site au feu, et donc sa possible inflammation, doivent être décrites précisément.

Pour montrer l'influence du pas de temps sur cette phase, nous avons sélectionné le site végétal js dont le centre a pour coordonnées (100 m ; 33 m) et tracé les évolutions au cours du

temps de sa température et sa teneur en eau pour des pas de temps variant de 0,1 à 1 s (Figure 19). Compte tenu des résultats obtenus au paragraphe précédent, le nombre de quanta radiatifs retenu est de 200 par mètre carré de flamme. Tous les autres paramètres sont identiques et fixés à ceux donnés dans le Tableau 2. La Figure 19 montre clairement qu'en utilisant un pas de temps de 1 s, la réponse thermique du site js n'est pas correctement décrite : la déshydratation se produit en moins d'une étape de temps et la température passe de 485 à 623 K en 1 s également, ce qui n'est pas du tout réaliste (on rappelle que la température d'inflammation est de 561 K). Pour $\Delta t = 0,5$ s, la phase de déshydratation prend 3 étapes de temps, ce qui en donne une meilleure description, mais le niveau atteint au moment de l'inflammation, soit 603 K, est trop éloigné de celui fixé comme donnée d'entrée (i.e. 561 K). Pour des valeurs du pas de temps plus faibles, la solution obtenue est de qualité, donnant une bonne représentation des phases de déshydratation et d'inflammation. Un bon compromis est d'utiliser un pas de temps de 0,2 s pour lequel l'effort de calcul est moindre (Tableau 5).

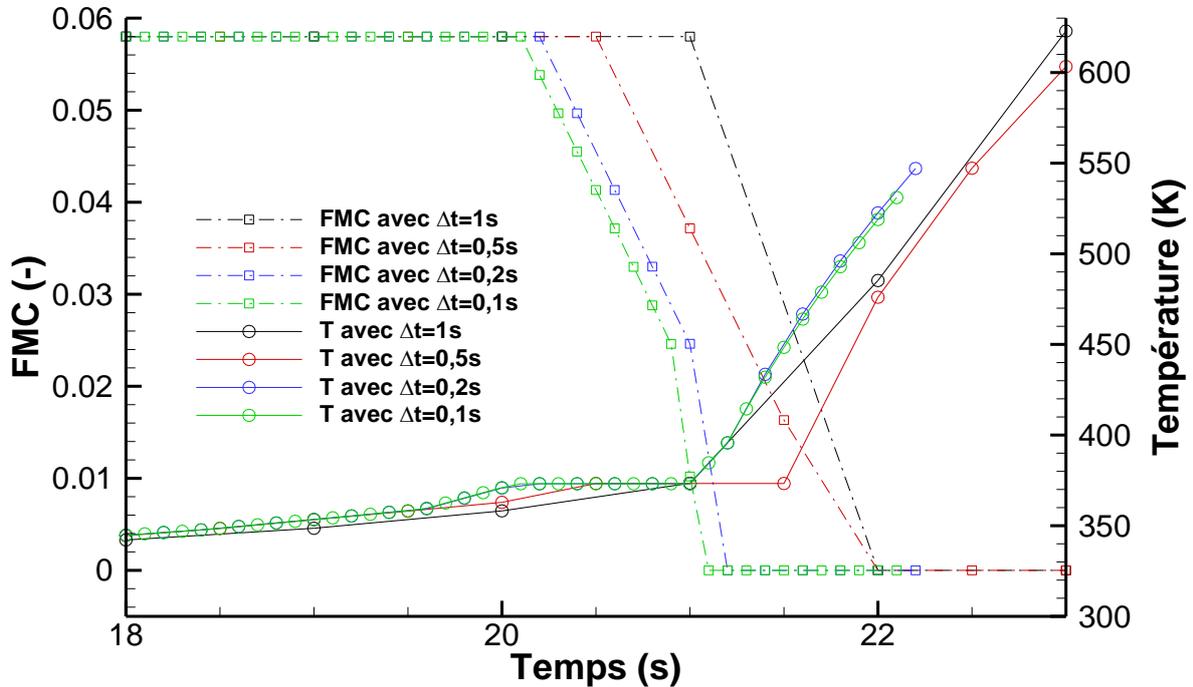


Figure 19 : Evolutions temporelles de la température et de la teneur en eau (FMC) du site *js* de centre (100 m ; 33 m) pour différents pas de temps.

Si l'on compare maintenant les contours de feu obtenus sur le cas de Cheney et al., à 56 et 86 s, avec ces valeurs du pas de temps (Figure 20), certaines constatations peuvent être faites :

- La vitesse de propagation de la tête du front de feu augmente lorsque le pas de temps diminue. Ce comportement semble logique compte-tenu du fait que la vitesse de propagation dépend essentiellement du délai d'inflammation des sites impactés par le front de flammes. Un pas de temps plus grand entraîne une inflammation plus tardive, et donc une propagation ralentie, comme le montre la Figure 19. En revanche, l'influence du pas de temps sur l'expansion latérale du feu est moindre.

- Les contours prédits en utilisant un pas de temps de 0,5 ou 1 s présentent une forme triangulaire peu réaliste due au réseau sous-jacent et à une représentation trop schématique du processus de préchauffage et de dégradation des sites exposés.

- On constate également qu'en dessous d'un pas de temps de 0,2 s, la vitesse de propagation du front évolue peu, la réponse thermique des sites exposés étant correctement décrite (Figure 19).

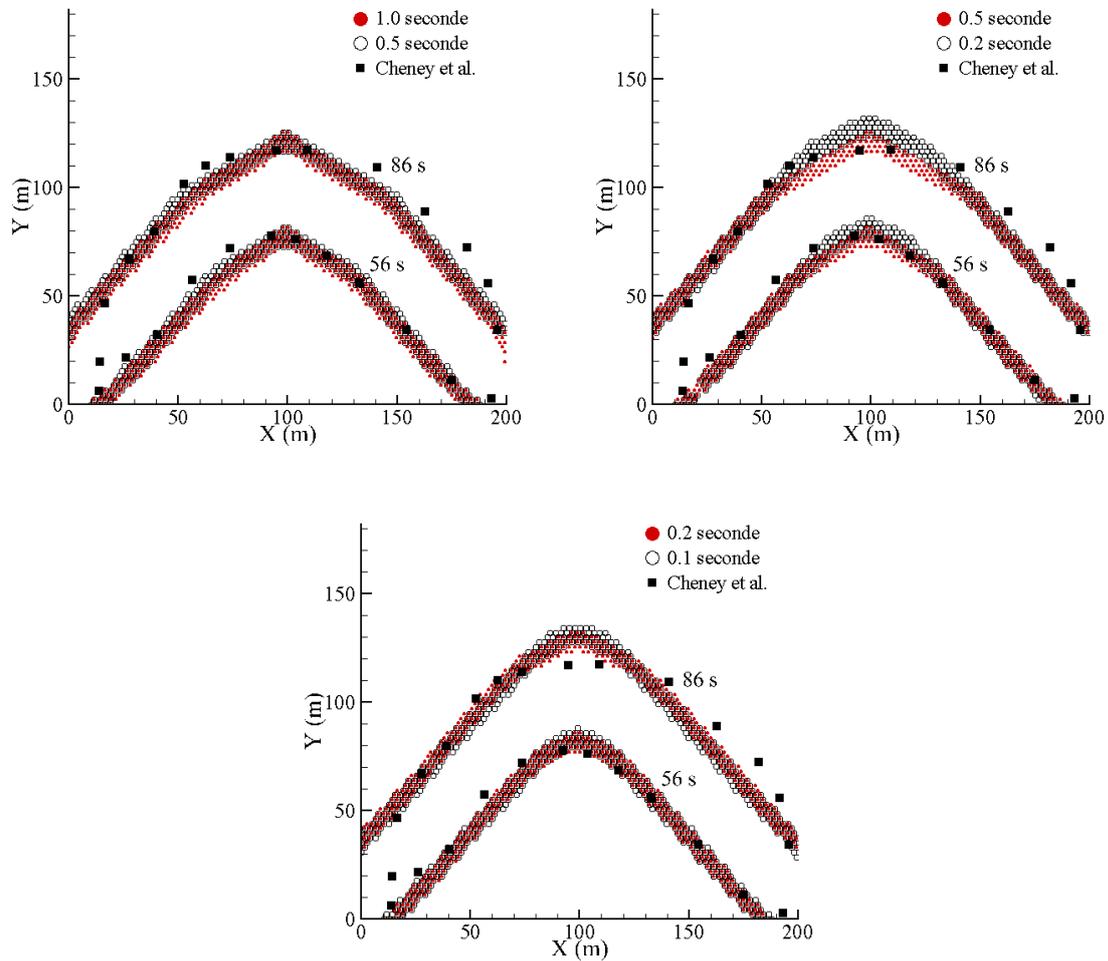


Figure 20 : Comparaison des contours de feu prédits avec des pas de temps de 0,1 s, 0,2 s, 0,5 s et 1 s.

2.5.3 Répétabilité du calcul statistique

La méthodologie consiste à simuler le brûlage dirigé de Cheney et al. (1993, 1998) un certain nombre de fois, ici en l'occurrence 10 fois, en utilisant les mêmes intrants, et à évaluer les écarts-type relatifs aux extrants que sont la vitesse de propagation du front de tête (tas : rate of spread, noté par la suite ros), l'aire de la surface en feu et celle de la surface brûlée. Compte tenu des conclusions des paragraphes précédents, le pas de temps retenu est de 0,2 s et le nombre de quanta générés par unité de surface de flamme de 200 quanta/m². Les autres paramètres du modèle sont ceux donnés dans le Tableau 2.

Le Tableau 6 donne les écarts-type σ obtenus après 56 et 86 s de propagation, l'écart-type étant défini de la façon suivante :

$$\sigma(x) = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (31)$$

où x_i est la valeur de l'extrait obtenu pour la réplique i et \bar{x} la valeur moyenne des extraits obtenus à l'issue des N répliques.

Tableau 6 : Ecarts-type relatifs sur la vitesse de propagation du front de tête, l'aire de la surface en feu et celle de la surface brûlée pour 10 répliques de la simulation du cas de Cheney et al..

Temps de passage	$\sigma(\text{ros})$ (%)	$\sigma(\text{Surface en feu})$ (%)	$\sigma(\text{Surface brûlée})$ (%)
56 s	0.00	1.12	0.47
86 s	0.00	1.03	0.45

Comme on peut le constater sur ce tableau, les écarts-type sont très faibles, généralement inférieurs à 1%, ce qui justifie que, pour ce type de feu, il ne soit pas nécessaire de répéter plusieurs fois la simulation. Cela est en grande partie dû à l'allumage en ligne qui « gomme » les fluctuations statistiques autour de la valeur moyenne du ros et des aires en feu et brûlées. Pour un allumage ponctuel, ces fluctuations seraient plus marquées et l'obtention d'une solution moyenne correcte nécessiterait de réaliser un grand nombre de répliques.

3. OPTIMISATION DU MODELE

L'étude précédente a montré combien l'utilisation de la méthode de Monte Carlo pour le calcul en temps réel du rayonnement émis par le front de feu et reçu par un site végétal était pénalisante pour le temps de calcul. Pour s'en affranchir et donner à l'outil numérique un caractère opérationnel, on se propose d'évaluer ce rayonnement en utilisant des abaques de facteurs de vue entre une flamme et la végétation environnante. Ces abaques sont préalablement construits en combinant la méthode de Monte Carlo à un algorithme génétique, pour une large gamme de propriétés de flammes et de conditions environnementales.

En outre, la modélisation d'un incendie à grande échelle nécessite de considérer un domaine d'étude suffisamment grand pour y inclure les zones pouvant être touchées par le feu et, par là-même, de gérer un très grand nombre de données. A titre d'exemple, sur un domaine de 10 km \times 10 km, recouvert à 60% de sites végétaux de 2 m de diamètre, le nombre de sites à

gérer est d'environ 10^7 sites et, pour chacun d'eux, les données qui lui sont propres, comme par exemple sa position, ses propriétés géométriques et thermo-physiques, sa température, sa teneur en eau, les flux thermiques incidents, son voisinage radiatif et convectif, ses conditions météorologiques, etc. Les ressources informatiques requises pour le traitement d'un tel cas sont considérables et dépassent la capacité de la plupart des ordinateurs. La méthode de suivi du front de feu que nous proposons permet de réduire le volume des données manipulées en se limitant aux seules données utiles au calcul de sa propagation.

3.1 Abaques de rayonnement

Comme le montrent les calculs de rayonnement effectués en combinant le modèle de flamme solide et la méthode de Monte Carlo, les iso-valeurs du facteur de vue entre la flamme et le sol ont une forme circulaire (flamme perpendiculaire au sol plat) ou elliptique (flamme inclinée par rapport au sol). La Figure 21 donne l'exemple d'un champ d'iso-facteurs de vue obtenus pour une flamme représentée par un cylindre de 2 m de diamètre, de 5 m de longueur et inclinée de 60° par rapport au sol (le sol est considéré comme une surface noire). Pour cet exemple, la flamme est discrétisée en 40×40 surfaces élémentaires et le nombre de quanta émis par unité de surface est de 10^7 . L'atténuation du rayonnement par la couche d'air entre la flamme et le sol est prise en compte, avec une humidité relative de l'air est de 20%.

Dans la méthodologie proposée pour construire les abaques de rayonnement, on suppose que chaque iso-facteurs de vue F_m peut être décrit par une ellipse ayant comme paramètres (Figure 22) :

- Le grand diamètre a_m
- Le petit diamètre b_m
- La distance entre le centre du site en feu i et le centre de l'ellipse c_m

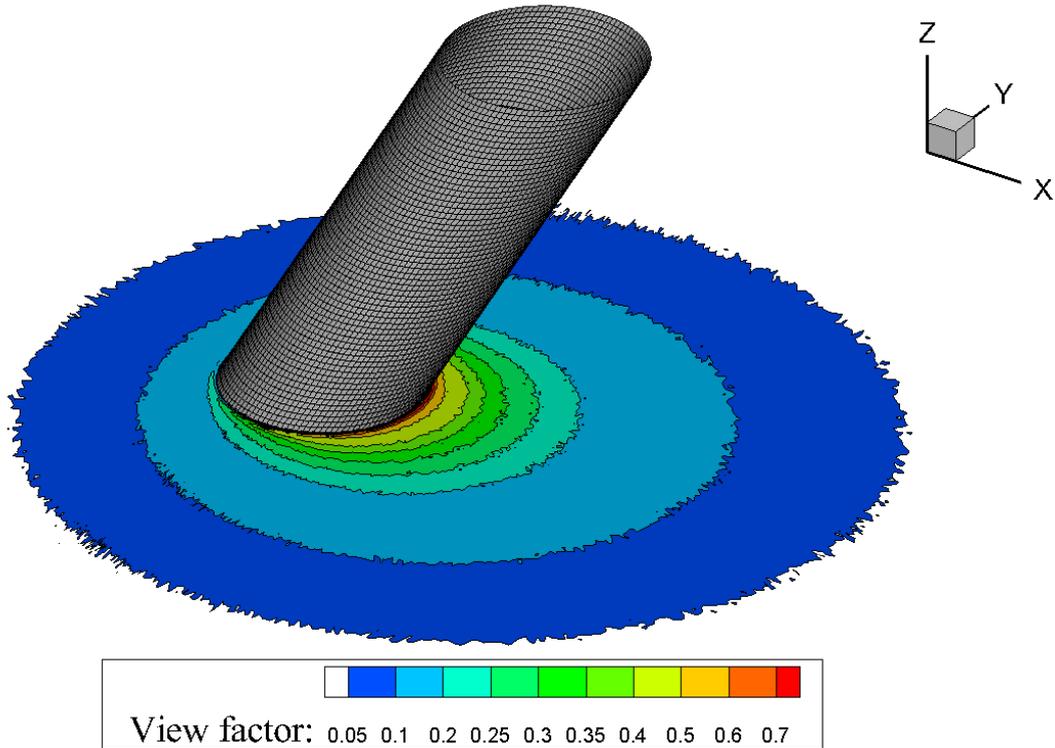


Figure 21 : Champ d'iso-facteurs de vue entre une flamme et le sol. La flamme considérée est un cylindre de 2 m de diamètre, 5 m de longueur, incliné de 60° par rapport au sol. L'humidité relative de l'air est de 20%. La flamme est discrétisée en 40×40 surfaces élémentaires. Le nombre de quanta émis par unité de surface s'élève à 10^7 .

Il existe de multiples approches pour déterminer quels sont les paramètres à attribuer à une ellipse pour qu'elle corresponde à un ensemble de points donnés dans le plan. Ces méthodes sont le plus souvent basées sur des méthodes de minimisation algébriques ou par moindres carrés, des méthodes de partitionnement floue des données (tas : fuzzy clustering) ou par réputation adaptative (tas : Adaptive Reputation Clustering), ou sur un algorithme génétique (Kanatani et Rangarajan, 2011 ; Liu et Qiao, 2009 ; Ahn et al., 2001 ; Qiao et Ong, 2007 ; Bezdek et al., 2005). C'est cette dernière méthode qui est utilisée dans ce manuscrit.

Les algorithmes génétiques ont été développés pour reproduire certains principes de la sélection et de l'évolution naturelle. Dans la présente application de l'algorithme génétique, chaque jeu de paramètres $\{a_m, b_m, c_m\}$ représente un individu au sein d'une population qui est soumise, génération après génération, à des étapes de sélection, reproduction et mutation.

Chaque individu représente donc une ellipse, qui est confrontée à l'ensemble des points de facteur de vue F_m du plan qui sont supposément répartis selon une forme elliptique, et un score d'adaptation, dont dépendra sa survie, lui est attribué.

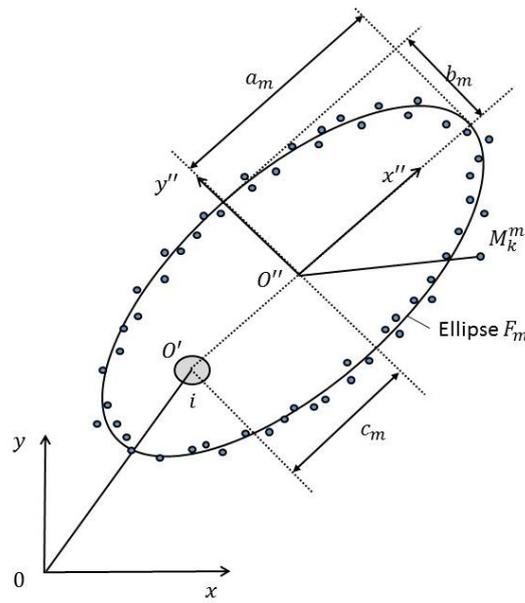


Figure 22 : Système de coordonnées attaché à un site en feu i , pour un iso-facteur m .

Pour une géométrie de flamme et un taux d'humidité de l'air donnés, on procède de la façon suivante :

1. la méthode de Monte Carlo est utilisée pour calculer le champ de facteurs de vue entre la flamme et chaque surface élémentaire du plan (x, y) .
2. pour chaque valeur du facteur de vue F_m choisie par l'utilisateur, un algorithme génétique (détaillé ci-après) est utilisé pour déterminer les paramètres de l'ellipse $\{a_m, b_m, c_m\}$ qui se rapproche au mieux de l'ensemble des éléments de surface au sol dont le facteur de vue est suffisamment proche de F_m , moyennant une certaine tolérance.
3. On répète l'opération M fois, M étant le nombre de facteurs de vue retenus par l'utilisateur.

En faisant varier la géométrie de flamme et le taux d'humidité sur une large gamme de valeurs, on constitue ainsi une base de données d'abaques de rayonnement.

Algorithme génétique

Dans un algorithme génétique, une population de N individus (X_1, X_2, \dots, X_N) évolue au fil des générations. A la génération g , chaque individu $X_I(g)$ est composé de trois paramètres, ou gènes, $\beta_1^I(g)$, $\beta_2^I(g)$, et $\beta_3^I(g)$, qui correspondent respectivement aux paramètres de l'ellipse a_m , b_m , et c_m pour une valeur donnée de l'iso-facteur de vue, F_m .

Les différentes étapes de l'algorithme d'optimisation, résumées dans l'organigramme en Figure 23, sont les suivantes :

A. Génération de la population initiale

La population initiale ($g = 1$) est générée de manière aléatoire, en utilisant l'expression suivante :

$$\beta_j^I(1) = R_{ini}\beta_{j,min} + (1 - R_{ini})\beta_{j,max} \quad (32)$$

où les paramètres $\beta_{j,min}$ et $\beta_{j,max}$ sont les limites supérieures et inférieures présupposées du gène β_j (en fait, ces valeurs peuvent être dépassées lors du calcul) et R_{ini} est un nombre aléatoire compris entre 0 et 1.

B. Tri de la population

Une proportion τ_{selec} de la population est sélectionnée pour la reproduction et la mutation, tandis que l'individu d'indice $I = 1$ est conservé tel quel. La fraction $1 - \tau_{selec}$ de la population restante est supprimée, puis le processus de génération aléatoire est appliqué pour régénérer cette partie de la population, qui n'est néanmoins pas concernée par les étapes C et D (reproduction et mutation). On conserve ainsi les individus les mieux classés, et on régénère les moins bien classés.

C. Reproduction (croisement)

Des couples sont formés parmi les individus classés de $I = 1$ à $I = \tau_{selec}N = N_{selec}$, et des enfants sont générés par combinaison linéaire de deux parents. La probabilité qu'un gène soit croisé est soumis au paramètre utilisateur p_{rep} . La reproduction est basée sur une boucle sur les couples ($II = 1, \dots, N_{selec}/2$). A chaque étape, un nombre aléatoire R_{rep} , uniformément

distribué sur l'intervalle $[0 ; 1]$, est généré pour produire une progéniture qui soit une combinaison linéaire des deux parents :

$$\begin{aligned}\beta_j^I(g+1) &= R_{rep}\beta_j^I(g) + (1 - R_{rep})\beta_j^{I+1}(g) \\ \beta_j^{I+1}(g+1) &= R_{rep}\beta_j^{I+1}(g) + (1 - R_{rep})\beta_j^I(g)\end{aligned}\tag{33}$$

pour $I = 2, 4, 6, \dots, N_{selec}$. On rappelle que l'individu $I = 1$ est conservé d'une génération sur l'autre.

D. Mutation

Un processus analogue à la mutation génétique est ensuite utilisé pour introduire une variabilité au sein de la population sélectionnée. De cette façon, on s'assure que l'ensemble des possibilités soit exploré, sans que la solution ne soit bloquée à un maximum local. Ce que l'on appelle alors une mutation est intégrée au processus au moyen d'une variation aléatoire sur un ou plusieurs gènes. La probabilité qu'un gène mute est spécifiée par l'utilisateur au travers du paramètre p_{mut} . Pour chaque gène de chaque individu, un nombre aléatoire R_{mut} est généré sur l'intervalle $[0 ; 1]$. La mutation a lieu sur le gène j d'un individu I si $R_{mut} \leq p_{mut}$. Si le gène est sélectionné pour la mutation, sa valeur est modifiée à partir de sa valeur actuelle. Ainsi, le paramètre utilisateur $\beta_{j,0}$ contrôle l'amplitude de mutation, également régulée par un nombre aléatoire R_{exc} généré sur l'intervalle $[0 ; 1]$:

$$\beta_j^I(g+1) = \beta_j^I(g)[1 + (R_{exc} - 0.5))\beta_{j,0}]\tag{34}$$

E. Fonction fitness

Soit A_m un ensemble de n éléments de surface du plan (x, y) de centre M_m^k ($1 \leq k \leq n$) dont les valeurs d'iso-facteur de vue F_m^k sont suffisamment proches de la valeur F_m considérée, avec une tolérance prédéfinie.

A cette étape, on attribue à chaque individu un score d'adaptation, selon la précision avec laquelle l'ellipse de paramètres $\beta^I(g)$ reproduit l'ensemble A_m , grâce à la fonction fitness définie comme suit :

$$f^I(g) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left[1 - \left(\frac{x''_{M_m^k}}{a_m^I} \right)^2 - \left(\frac{y''_{M_m^k}}{b_m^I} \right)^2 \right] \quad (35)$$

où $x''_{M_m^k} = x_{M_m^k} - x_{O'} - c_m^I$ et $y''_{M_m^k} = y_{M_m^k} - y_{O'}$, représentent les coordonnées de M_m^k dans le repère de l'ellipse (O'', x'', y''), $x_{M_m^k}$ et $y_{M_m^k}$ sont les coordonnées de M_m^k dans le repère fixe (O, x, y), et $x_{O'}$ et $y_{O'}$, les coordonnées du site en feu i dans le repère fixe. a_m^I , b_m^I et c_m^I sont les paramètres d'ellipse de l'individu I considéré. On classe ensuite les individus en fonction de leur score.

F. Sélection pour la prochaine génération

Une fraction τ_{selec} de la population est utilisée pour produire la génération suivante. Un individu peut être sélectionné plus d'une fois. L'individu le mieux adapté est sélectionné tel quel pour la prochaine génération et numéroté $I = 1$, tandis que les individus classés de 2 à N_{selec} ont une probabilité de se reproduire inversement proportionnelle à leur score d'adaptation : $\sum_{i=1}^{N_i} f^i / f^I$. De ce fait, les candidats dont le score est relativement faible sont éliminés, alors que les autres survivent pour la prochaine génération.

G. Convergence

Le processus de sélection, reproduction et mutation est réitéré jusqu'à ce que le score d'adaptation de l'individu le mieux adapté ne change pas significativement sur un nombre de G générations, obéissant au critère suivant :

$$|f^1(g) - f^1(g - G)| \leq tol \text{ pour } g > G \quad (36)$$

Si ce critère n'est pas satisfait, on répète la procédure à partir de l'étape B.

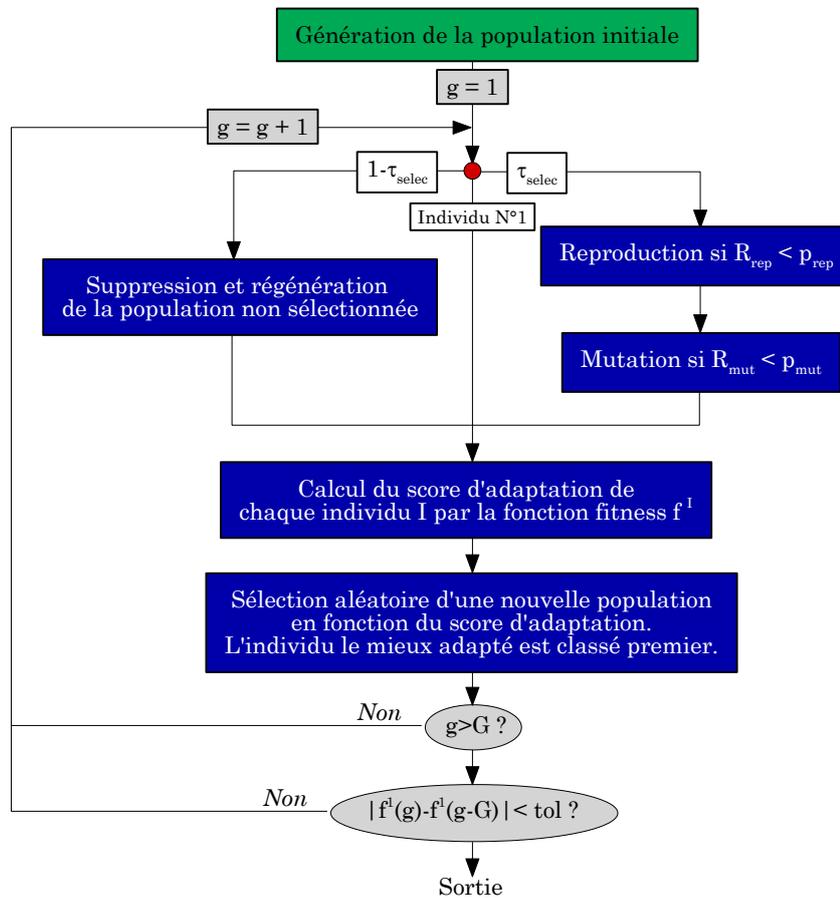


Figure 23 : Principe de fonctionnement de l'algorithme génétique.

Exemple d'application

A titre d'exemple, l'algorithme génétique (AG) est utilisé pour déterminer les paramètres des ellipses représentant les iso-facteurs de vue dans les conditions de la Figure 21. Les paramètres de l'AG, regroupés dans le Tableau 7. On considère 40 iso-facteurs de vue, dont les valeurs sont comprises entre 0,001 et 0,9, avec un pas d'autant plus resserré que l'on se rapproche de la flamme afin de prendre en compte la loi de variation du rayonnement en fonction de la distance à la source.

Comme montré Figure 24, l'accord entre les ellipses déduites de l'AG et chaque nuage d'éléments de surface A_m du plan (x, y) , dont les iso-facteurs de vue sont suffisamment proches de F_m (avec une tolérance relative de 0,01) est excellent.

Tableau 7 : Paramètres de l'algorithme génétique utilisés dans l'exemple de la Figure 21.

Paramètre	Valeur
Effectif de la population: N	150
Nombre de générations : G	100
Limite inférieure des gènes 1 à 3 : $\beta_{1min}, \beta_{2min}, \beta_{3min}$	0
Limite supérieure des gènes 1 et 2 : $\beta_{1max}, \beta_{2max}$	$3L^f$
Limite supérieure du gène 3 : β_{3max}	R_f
Paramètre de contrôle de l'amplitude de mutation : $\beta_{j,0}$	0,25
Taux de sélection : τ_{selec}	0,75
Probabilité de mutation : p_{mut}	0,75
Probabilité de reproduction : p_{rep}	0,25
Nombre de générations utiles à la convergence (Eq.(33)) : G	100
Tolérance relative (Eq.(33)) : tol	10^{-3}

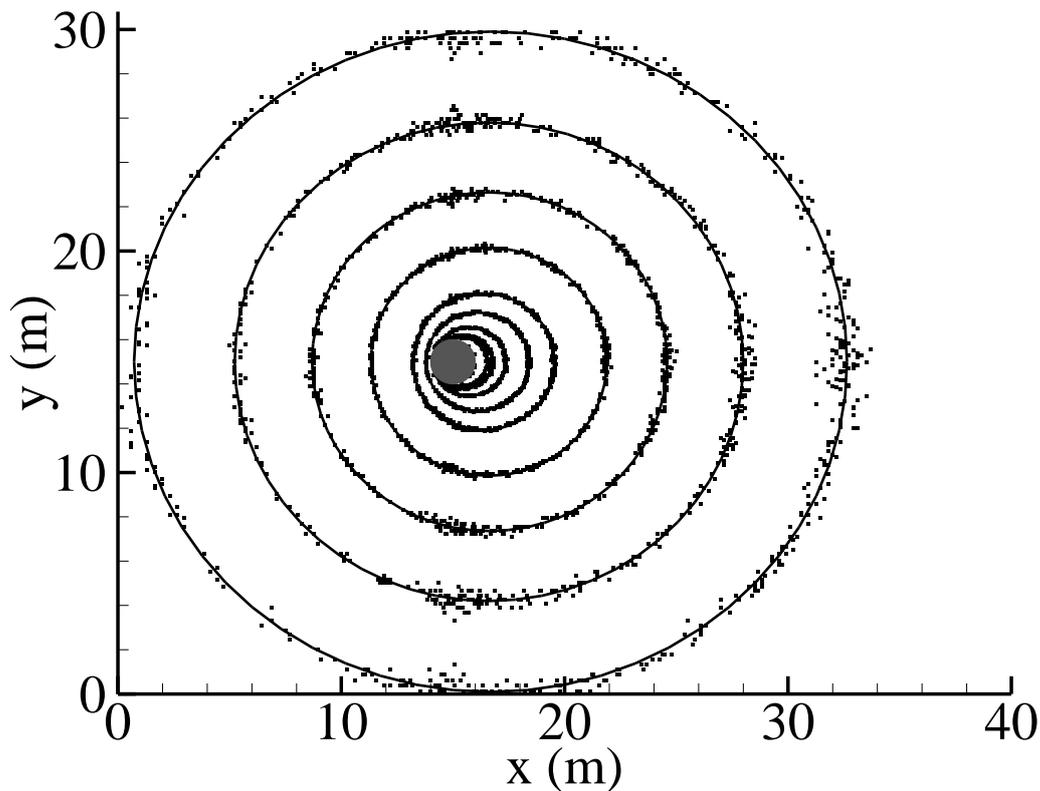


Figure 24 : Ellipses des iso-facteurs de vue déterminées par l'algorithme génétique dans les conditions de la Figure 21. En trait plein, sont représentés les iso-facteur suivants : $F = [0.37, 0.31, 0.22, 0.14, 0.84 \times 10^{-1}, 3.13 \times 10^{-2}, 1.17 \times 10^{-2}, 4.38 \times 10^{-3}, 1.64 \times 10^{-3}]$. Le disque gris représente la base de la flamme.

3.2 Méthode de suivi de front

Cette méthode peut être vue comme un système autonome où les sites végétaux sont générés « à la volée », non pas sur la totalité du domaine d'étude mais seulement sur les pixels du Modèle Numérique de Terrain (MNT) proches du front de flammes. Ces pixels, dits actifs, contiennent toute l'information nécessaire au calcul de la propagation du feu.

La méthode est basée sur un triple indexage. Chaque site végétal k appartenant au pixel (i, j) du MNT est alors repéré par trois indices (i, j, k) . Lorsque ce site végétal (i, j, k) s'enflamme (Figure 25a), la tâche principale consiste alors à actualiser le réseau en prenant en compte, au minimum, les huit pixels les plus proches du pixel (i, j) (Figure 25b). On génère ensuite les sites végétaux dans les pixels voisins vides (Figure 25c), on les numérote et on stocke en mémoire toutes les propriétés qui leur sont attachées. La recherche des sites végétaux situés dans le voisinage radiatif et convectif d'un site en feu (i, j, k) s'en trouve facilitée dans la mesure où elle ne se fait que sur le pixel (i, j) et ses huit pixels voisins. Afin de limiter les ressources mémoires utilisées, les pixels entièrement brûlés sont supprimés de la mémoire et ne peuvent plus être régénérés. Les pixels momentanément hors de portée du front de flamme sont également supprimés de la mémoire, mais peuvent être régénérés à la suite d'un éventuel changement de direction de propagation du feu, en cas de renverse de vent par exemple.

Dans le cas d'un réseau cristallin, la génération des sites combustibles ne pose pas de problème majeur, la répartition étant soumise à des règles géométriques assez simples. Dans le cas d'un réseau amorphe, la génération aléatoire des sites combustibles peut se révéler beaucoup plus coûteuse en temps de calcul. Une méthode de pré-génération de réseau a donc été développée. Elle consiste à générer statistiquement un grand nombre de réseaux de la dimension d'un pixel du MNT avec des paramètres prédéfinis (un diamètre de site, un taux de remplissage ou encore une distribution en tailles de sites dans le cas d'un réseau polydisperse), puis à les stocker dans un fichier où le code de calcul va venir « piocher » de manière aléatoire en cours de simulation.

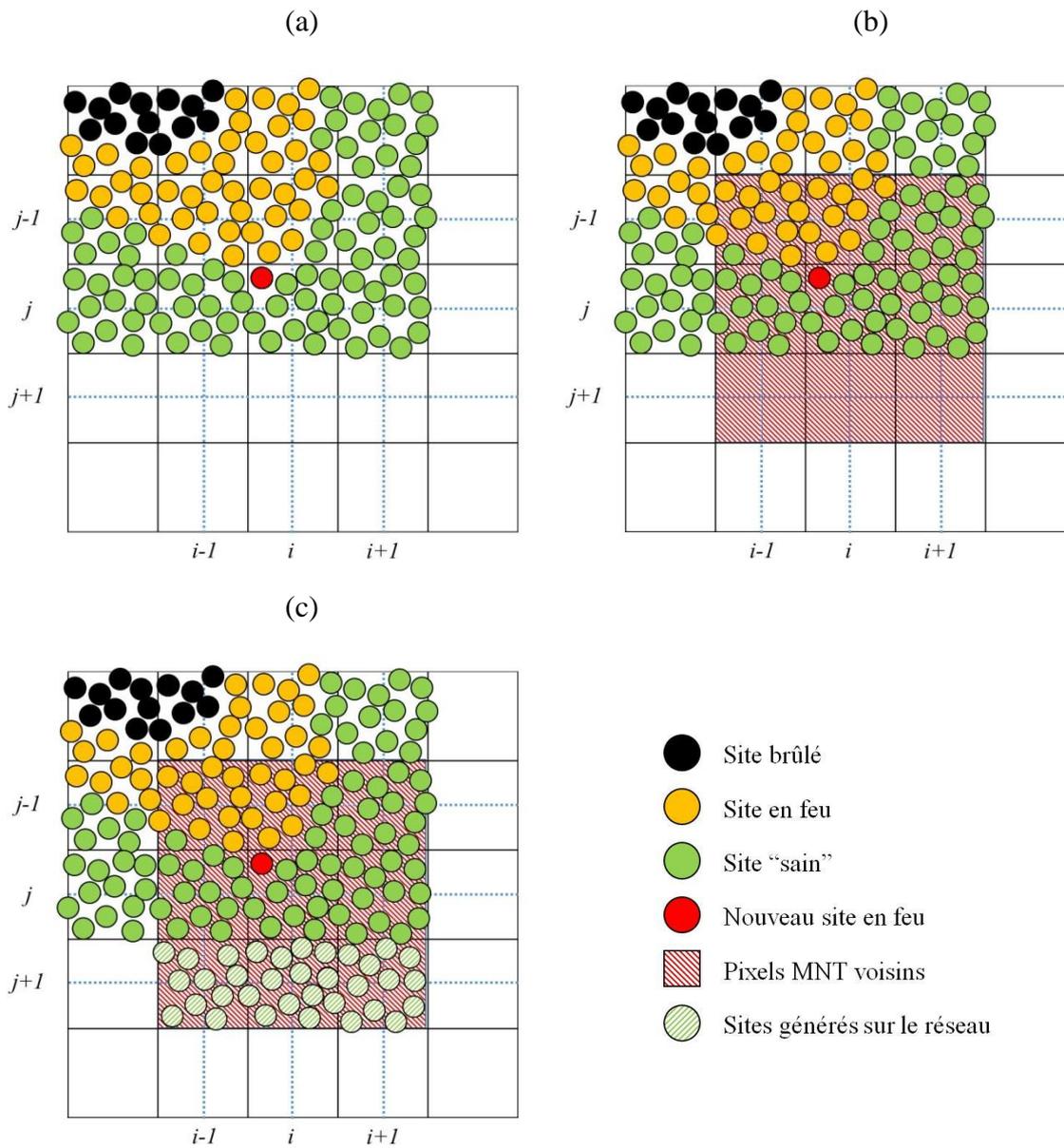


Figure 25 : Les différentes étapes de la génération du réseau : (a) un site s'enflamme sur le pixel (i, j) du MNT ; (b) on repère les 8 pixels voisins ; (c) on génère les sites végétaux sur les nouveaux pixels vides.

3.3 Evaluation de la performance du modèle optimisé

Pour évaluer l'efficacité des améliorations proposées précédemment, on se propose de comparer les solutions obtenues, ainsi que les ressources informatiques mobilisées, en utilisant les versions suivantes du modèle :

- version MMC : version utilisant la méthode de Monte Carlo en temps réel et pour laquelle le réseau de sites est généré à l'instant initial sur la totalité du domaine d'étude. Le nombre de quanta par mètre carré de flamme est de 200 ;
- version AnoFT : version utilisant les abaques de rayonnement ;
- version AFT : version utilisant les abaques de rayonnement et la méthode de suivi de front

Ces versions sont appliquées successivement au brûlage dirigé de Cheney et al. (1993 ; 1998) et à un scénario de feu fictif se propageant sur un grand domaine, de 1km×1km, puis de 2km×2km. Pour ces simulations, un pas de temps optimal de 0,2 s est utilisé (voir paragraphe 2.5.2).

3.3.1 Brûlage dirigé de Cheney et al.

Dans le cas de Cheney et al. pour lequel les hétérogénéités sont absentes (terrain plat, végétation monodisperse, homogène et continue, et conditions météorologiques constantes), l'abaque de rayonnement utilisé pour les calculs présentés ci-après ne comporte qu'une seule configuration géométrique de flamme.

Sur la Figure 26, nous comparons les contours mesurés après 56 et 86 s de feu avec ceux prédits en utilisant les versions AFT, AnoFT et MMC. Les résultats obtenus avec les versions AFT et AnoFT y sont regroupés car ils sont strictement identiques.

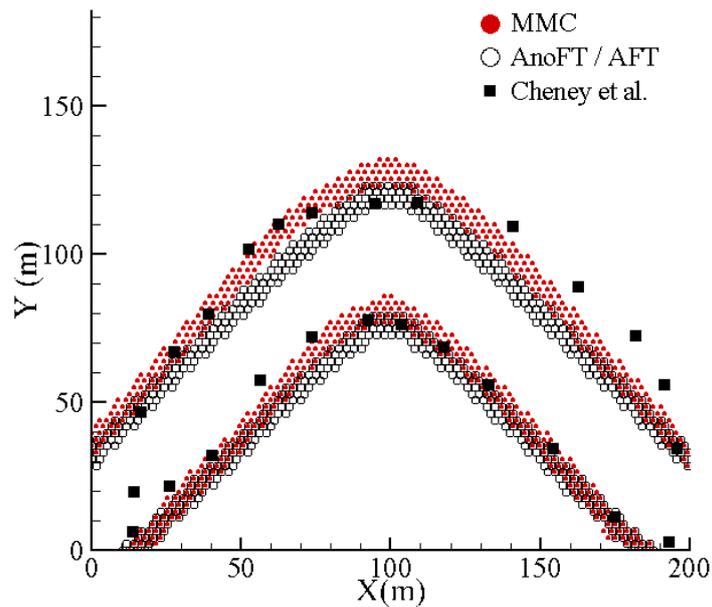


Figure 26 : Comparaison des contours mesurés et prédits avec les versions MMC, AFT et AnoFT après 56 et 86 s de feu.

La première constatation est que les versions utilisant les abaques de rayonnement conduisent à des résultats sensiblement identiques à ceux obtenus avec la version MMC, notamment en ce qui concerne la forme du front. Néanmoins, la propagation du feu en tête et sur les flancs est globalement moins rapide. Deux raisons peuvent expliquer les écarts observés. D'une part, la valeur de l'iso-flux attribuée à chaque site voisin d'un site en feu est celle qui correspond à la première ellipse qui englobe le centre du site (Figure 27), ce qui conduit à sous-estimer le rayonnement reçu. Une solution consisterait à optimiser le nombre et/ou la distribution des iso-facteurs de vue (dans le cas présent, 40). D'autre part, le calcul radiatif à l'aide des abaques néglige la contribution du rayonnement reçu par la face latérale du site récepteur, ce qui tend également à sous-estimer le préchauffage radiatif de ce site. Toutefois, comme le montre la Figure 28 où nous avons comparé les contours obtenus avec la version MMC, sans tenir compte du rayonnement latéral, et la version AFT, cette contribution est relativement faible.

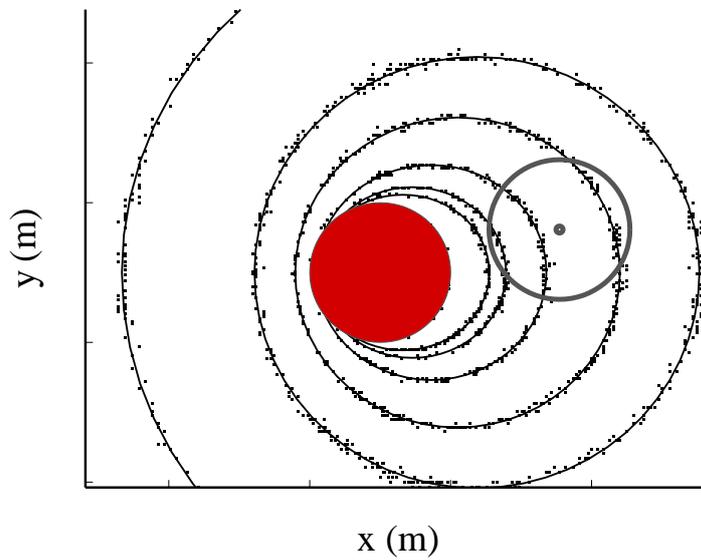


Figure 27 : Illustration d'un site combustible dans un champ d'iso-facteurs de vue.

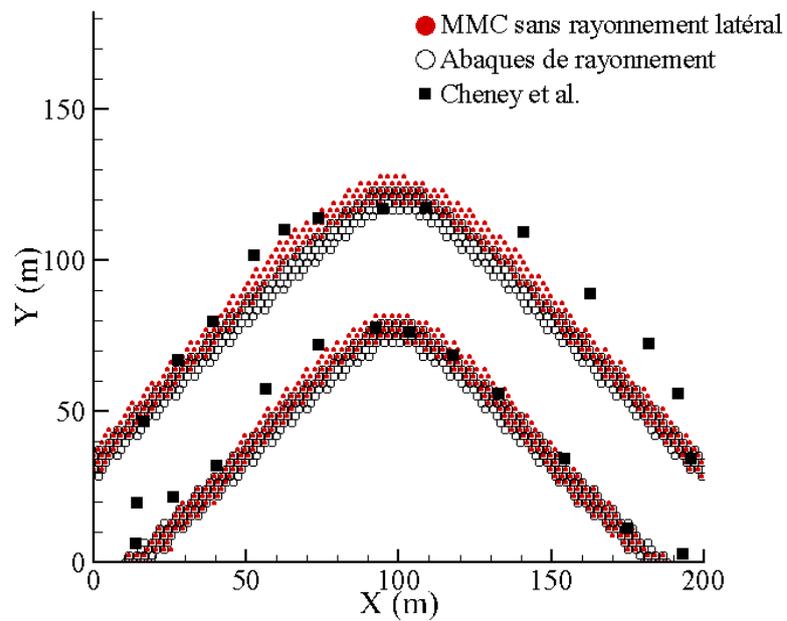


Figure 28 : Comparaison des contours obtenus avec la version MMC, sans rayonnement latéral, et la version AFT. Pour ces simulations, le pas de temps est de 0,2 s et le nombre de quanta par mètre carré de flamme est de 200.

Si de légères différences sont observées sur les résultats des simulations MMC et AFT/AnoFT, les ressources informatiques qu'elles nécessitent sont sans commune mesure. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer les temps de calcul et les allocations mémoires mobilisées par ces différentes versions du modèle (Tableau 8). En effet, l'utilisation d'abaques de rayonnement permet de réduire d'un facteur 144 le temps de calcul et d'un facteur 2,6 l'allocation mémoire. En revanche, les gains obtenus avec la version AFT par rapport à la version AnoFT sont relativement modérés, évalués à environ 20%. Cela vient du fait que, pour un domaine de faible étendue, l'effort de calcul nécessaire à la génération du réseau en temps réel efface en grande partie le gain apporté par la méthode de suivi de front.

Tableau 8 : Temps CPU et allocation mémoire requis pour simuler 86 s du brûlage dirigé de Cheney et al. avec les différentes versions du modèle de propagation. Toutes les simulations ont été réalisées sur un seul processeur de type Intel® Xeon® CPU E5-2643 cadencé à 3.30 GHz.

Version	Temps de calcul (s)	Allocation mémoire (MB)
MMC	6652	171
AnoFT	46	66
AFT	37	50

3.3.2 Evaluation sur un grand domaine d'étude

Appliqué à un grand domaine, l'allocation mémoire et le temps CPU requis pour les simulations utilisant la version MMC dépassent rapidement celles disponibles sur la plupart des ordinateurs. De plus, comme cela a été observé sur le cas de Cheney et al. (Tableau 3), cette version ne permet pas de simuler en temps réel la propagation d'un feu sur une grande étendue.

Dans ce qui suit, nous comparons donc seulement les simulations de la propagation d'un feu sur deux domaines fictifs de grandes dimensions, en l'occurrence 1 km×1 km et 2 km×2 km, réalisées à l'aide des versions AFT et AnoFT. Dans les deux cas, le terrain est supposé plat et les conditions météorologiques et de végétation, arbitraires, sont données dans le Tableau 9.

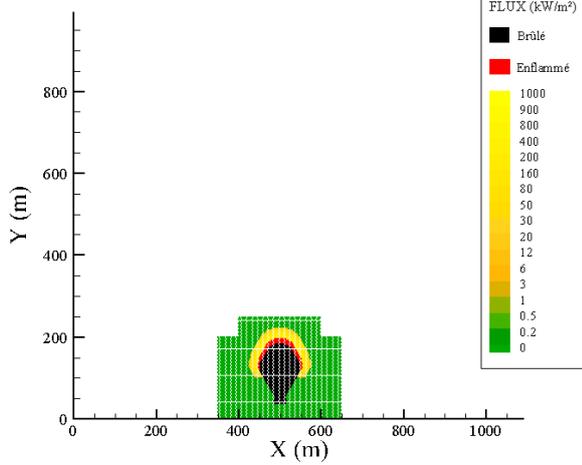
Tableau 9 : Paramètres utilisés dans les simulations destinées à l'évaluation de la méthode de suivi d'interface.

U (m/s) (à 2 m du sol)	4,83	ε (-)	0,9
T_{∞} (K)	307	a (-)	0,8
RH (%)	20	τ (s)	15
H (m)	2	Δh (MJ/kg)	14,454
m^{DFP} (kg/m ²)	2	T_{ign} (K)	561
m^{eau} (kg/m ²)	0,5	χ^r (-)	0,35
ρ^{DFP} (kg/m ³)	512	T^b (K)	T^f
σ (1/m)	5540	D (m)	5

La végétation étant supposée continue et homogène, on utilise un réseau cristallin où le taux de remplissage est maximum (~ 0.91). Le pas de temps utilisé est de 1 s. Une résolution standard de 50 m a été retenue, donnant des pixels MNT carrés de 50 m de côté. L'allumage se fait sur une zone circulaire d'une quinzaine de mètres de rayon, autour d'un point de coordonnées (500 m ; 40 m) pour toutes les simulations. On simule 1000 s de propagation et on enregistre l'avancée du front de flammes à 200, 400, 600, 800 et 1000 secondes afin de comparer les deux versions du modèle.

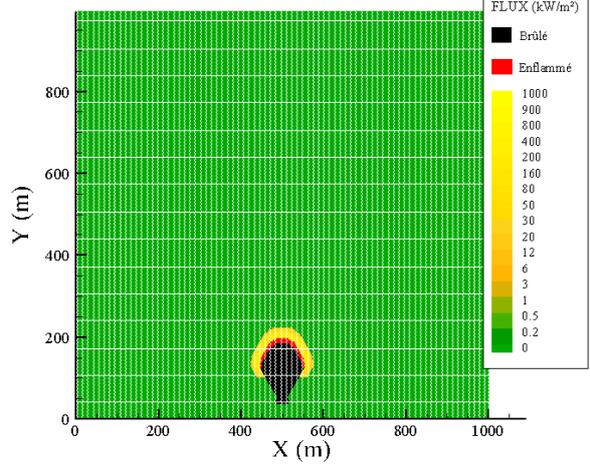
Avec suivi d'interface

Temps = 200 s

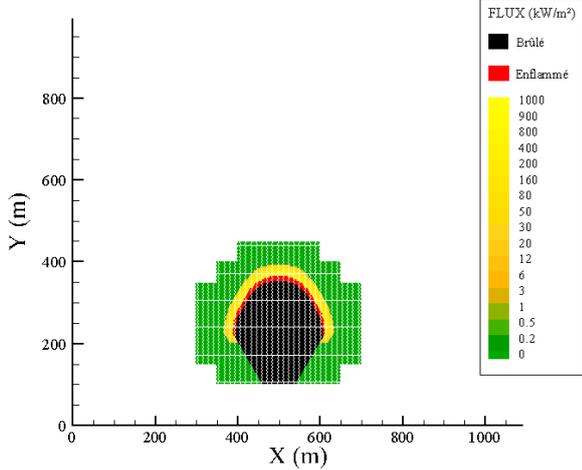


Sans suivi d'interface

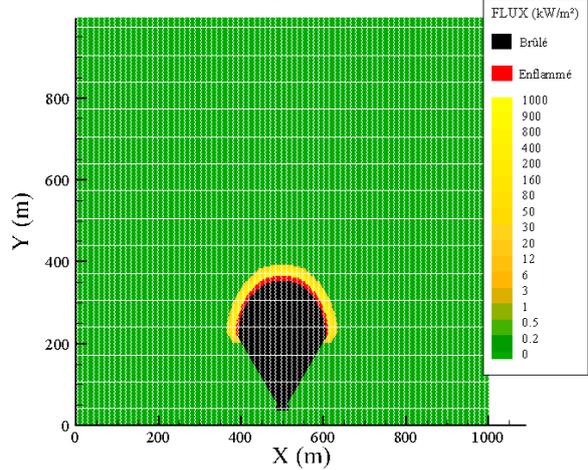
Temps = 200 s



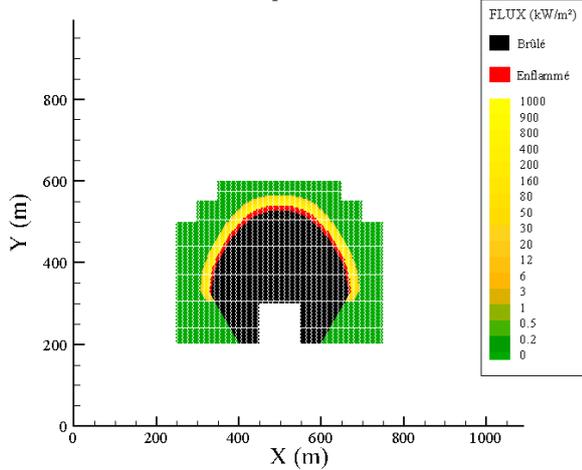
Temps = 400 s



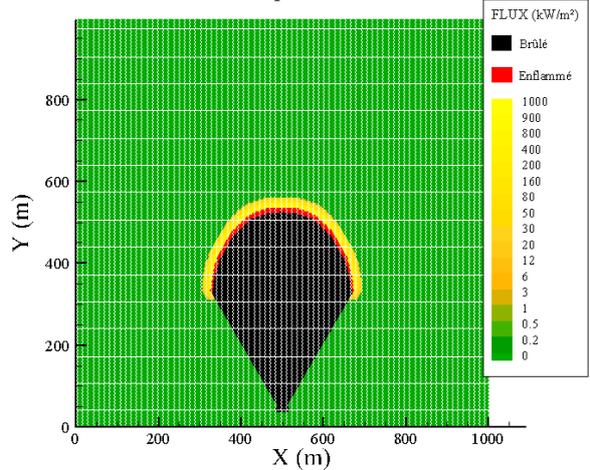
Temps = 400 s



Temps = 600 s



Temps = 600 s



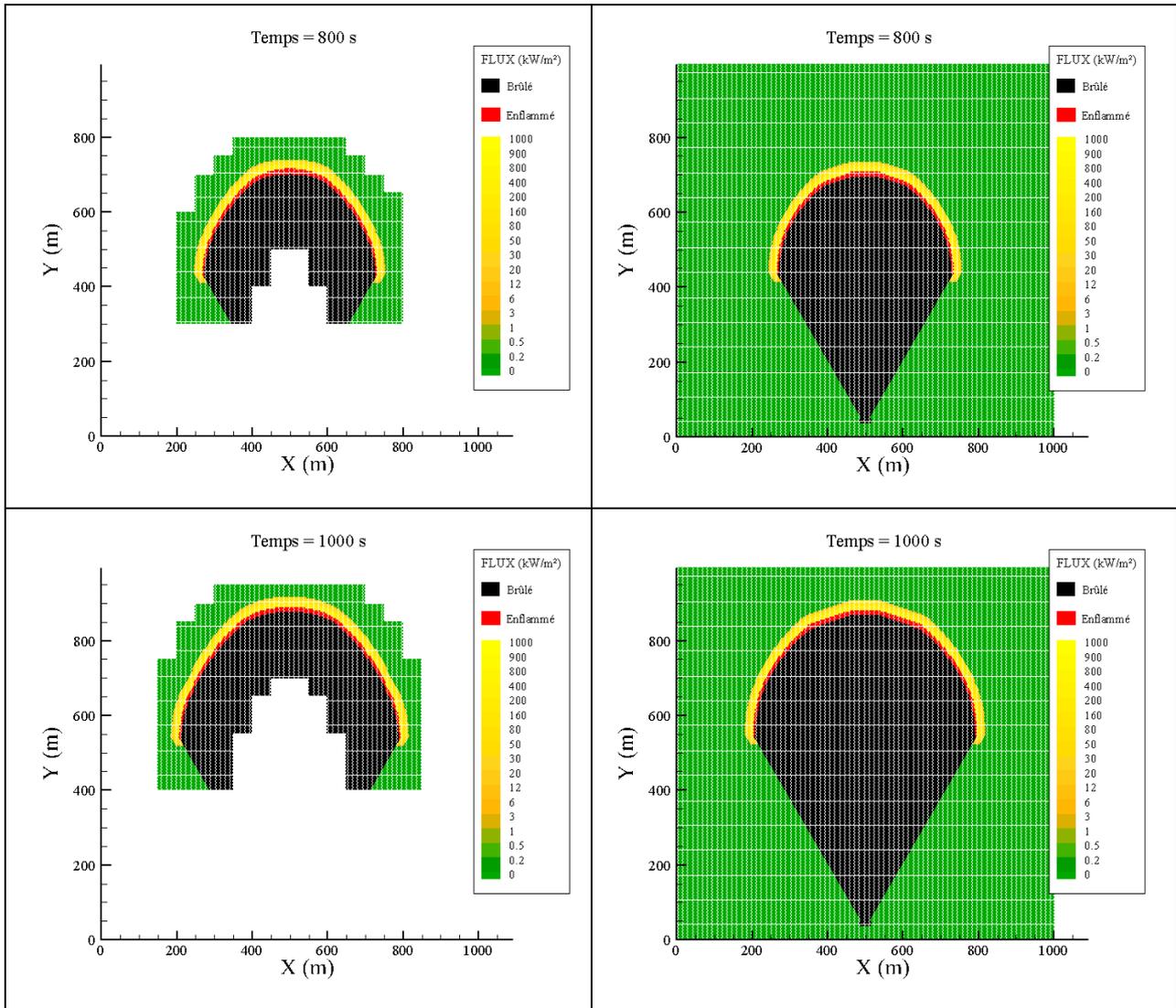


Figure 29 : Comparaison des contours calculés avec les versions AFT et AnoFT sur un domaine de 1 km².

Comme le montre la Figure 29, l'utilisation de la méthode de suivi de front ne produit aucune altération des contours calculés avec la version AnoFT. Les surfaces en feu et brûlées, ainsi que la zone de préchauffage située devant le front sont strictement identiques.

Le même calcul est effectué sur un terrain de 2 km×2 km, pour un résultat exactement identique (Figure 30). On ne montre ici que le résultat obtenu finalement, au bout de 1000 secondes. Les ressources informatiques mobilisées sont données dans le Tableau 10.

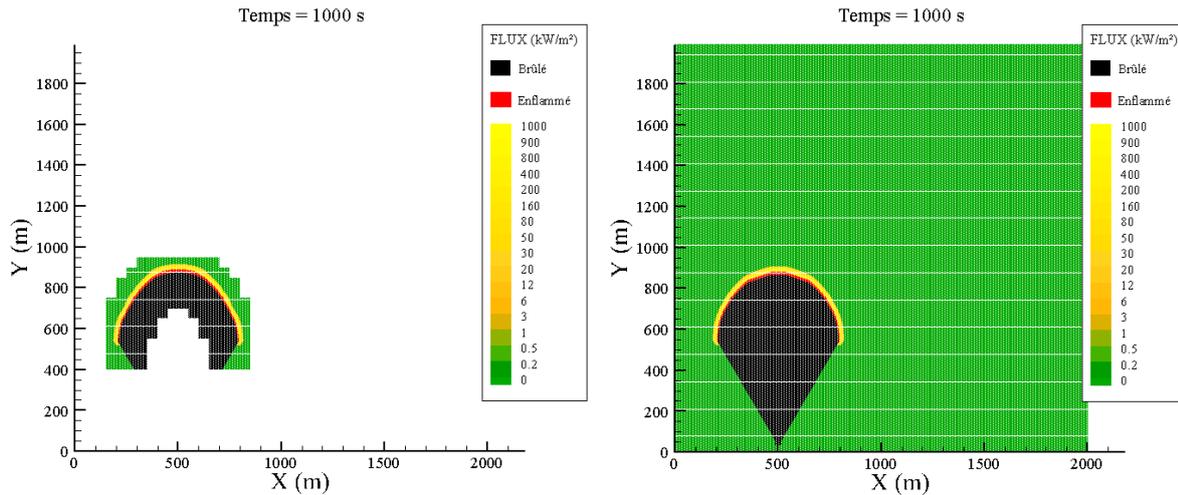


Figure 30 : Comparaison des contours calculés avec les versions AFT et AnoFT sur un domaine de 4 km².

Tableau 10 : Récapitulatif des performances du modèle avec et sans utilisation du suivi d'interface.

Version	Dimensions du domaine (m)	Temps CPU (secondes)	Mémoire mobilisée (Mo)
AnoFT	1000×1000	505	229
	2000×2000	634	366
AFT	1000×1000	377	180
	2000×2000	366	183

L'effet de la taille du domaine est visible sur le calcul qui n'utilise pas la méthode de suivi d'interface (505 s pour le domaine de 1000 m de côté contre 634 s pour celui de 2000 m), tandis que l'utilisation du suivi d'interface rend quasiment nul l'effet de la taille du domaine (377 s contre 366 s). Le suivi d'interface permet également de limiter les ressources mémoires mobilisées, puisqu'en doublant la taille du domaine, la mémoire utilisée présente un gain supérieur à 60% avec la méthode traditionnelle, tandis qu'elle reste quasiment constante avec la méthode de suivi.

Tous les gains obtenus résultent uniquement de l'utilisation des abaques de rayonnement et de la méthode de suivi de front, les codes restant strictement identiques en tous points. Une autre grande partie de cette thèse, notamment en raison des objectifs du projet TechForFire, a été de remodeler la structure du code afin d'optimiser l'algorithme pour un traitement informatique plus rapide.

Les premières versions du code ont été programmées avec peu de considérations d'optimisation, priorité étant, logiquement, donnée à la reproduction du phénomène physique. Pour reprendre une citation de Donald Knuth (1974) : « We should forget about small efficiencies, say about 97% of the time: premature optimization is the root of all evil. ».

Après profilage, qui permet de déterminer où le code passe le plus de temps, la première étape a donc été de revoir l'agencement de ces boucles, afin que leur nombre soit minimal et que leur traitement soit le plus rapide possible. Ce travail d'ordre informatique ne sera pas détaillé, mais il a reposé essentiellement sur la réunion de toutes les boucles qui pouvaient l'être, la gestion des indices de boucles (prendre en compte le caractère « column-major » du stockage de données en fortran 90), l'agencement du code pour limiter le nombre d'opérations, ou encore limiter les accès mémoires, qui sont de loin plus lents qu'une opération effectuée par le processeur. Une fois l'algorithme épuré et les boucles regroupées, une parallélisation du code efficace a finalement été appliquée, en utilisant les bibliothèques OpenMP, pour compléter cette optimisation structurelle du code.

Une fois totalement optimisé, les capacités du code de calcul permettent une simulation complète sur le cas de Cheney, avec base de données radiative et suivi d'interface, effectuée en moins d'une seconde sur quatre processeurs. Les capacités de calcul sur un feu de plus grande ampleur sont données dans le chapitre suivant.

4. APPLICATIONS

Afin de valider le modèle AFT, incluant les derniers développements concernant les abaques de rayonnement et le suivi de front, et d'évaluer sa capacité à fournir des simulations « temps-réel », on se propose de simuler trois scénarios d'incendies. Ces scénarios diffèrent par la nature des hétérogénéités rencontrées par le feu lors de sa propagation, à savoir la topographie du terrain, les conditions météorologiques et de végétation, et donc par le mode de propagation.

Le premier scénario de feu correspond à un brûlage dirigé que nous avons réalisé en Thaïlande, près de la ville de Chiangmai, en collaboration avec les Universités de Bangkok, dans le cadre d'un Programme Hubert Curien. Le feu s'est propagé sur une parcelle de 150 m × 50 m couverte d'une litière de feuilles. En raison d'une pente de terrain légère et d'un vent faible, sa propagation était très lente, avec des flammes de petites tailles.

Le second est un feu criminel de 2009 qui a eu lieu près de Favone, en Corse. Bien documenté par Santoni et al. (2011), ce feu s'est propagé sur un kilomètre de long et 500 mètres de large, en l'espace d'une heure et quinze minutes. La végétation, méditerranéenne, était cette fois composée d'arbustes avec une litière de feuilles et de branches.

Enfin, pour tester les capacités du modèle à décrire la propagation d'un feu de grande étendue, le modèle a été appliqué à un incendie historique au Colorado, le East Peak Fire. En raison de l'absence d'étude et de publication scientifique sur cet incendie, c'est à partir de données satellitaires, de contours de feu et d'informations de la presse qu'une tentative de simulation d'une partie de ce feu a été effectuée.

4.1 Brûlage dirigé de Chiang Mai

Des études sur le brûlage de végétation thaïlandaise ont été menées en 2013 dans le cadre d'un projet Partenariat « Hubert Curien » « SIAM », débuté en 2012, auquel participaient l'IUSTI et les universités thaïlandaises King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) et North Bangkok (KMUTNB).

Ce projet avait pour objectif principal d'estimer les émissions de gaz polluants et de particules générés par un incendie. Plus spécifiquement, cette caractérisation visait les feux de biomasses qui, durant la période sèche (de décembre à avril), provoquent la formation de brouillards de pollution dans le nord de la Thaïlande, ainsi que dans une partie du grand Delta du Mékong, comprenant le Cambodge, le Myanmar, le Laos, la Thaïlande et le Vietnam. Cette pollution est essentiellement due aux incendies volontaires de litière de feuilles, à des fins de

simple nettoyage ou pour nourrir les terres dans le cadre d'agriculture sur brûlis (spécifique à la production d'huile de palme tout particulièrement). C'est un réel problème sanitaire de grande ampleur, qui provoque une augmentation du risque de maladies respiratoires des populations exposées, et qui touche également l'économie du pays (circulation aérienne perturbée, tourisme en baisse, ...).

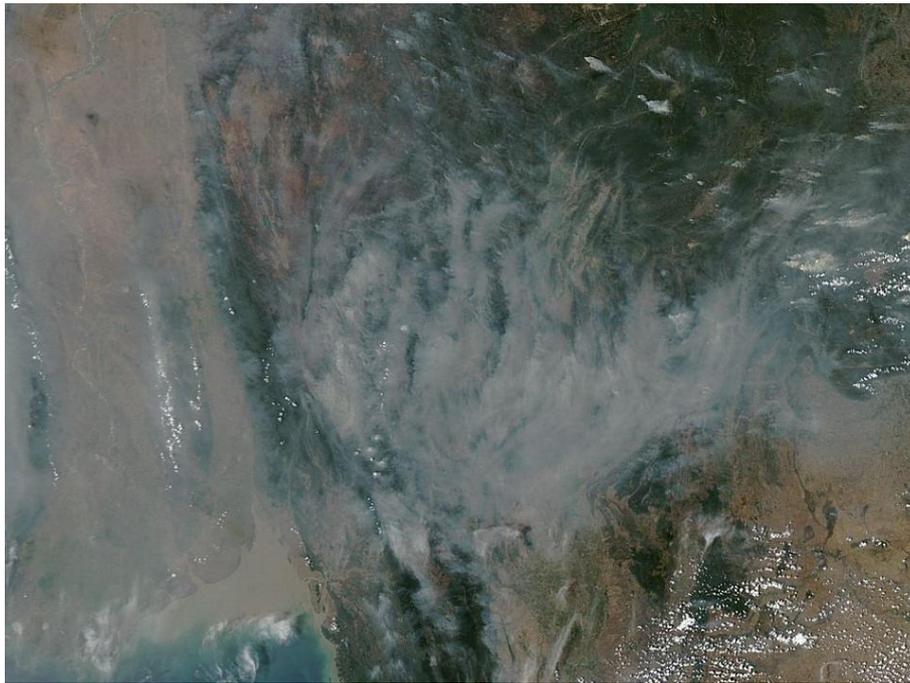


Figure 31 : Image du satellite MODIS du 24 Mars 2013, où apparaissent les fumées dues aux feux.

Source : NASA EarthObservatory

Les études sur brûlages dirigés ont été conduites dans la province de Chiang Mai, particulièrement touchée par cette problématique. Deux parcelles d'environ 5000 m² chacune ont été :

- instrumentées : analyse de gaz, mesure de la vitesse et de la direction du vent (Figure 33) et marqueurs géolocalisés afin d'établir un quadrillage de chaque parcelle pour mesurer la propagation (Figure 34) ;
- préparées : le couvert végétal a été homogénéisé de manière à ce que la propagation et les émissions de gaz ne soient pas trop parasitées ;

- caractérisées : le relief a été cartographié et un modèle numérique de terrain (voir Figure 35) a été établi par la combinaison de marqueurs géo-référencés mesurés avec un module GPS Trimble pro XT sur l'ensemble du domaine et raffinés sur des zones particulières (fortes pentes locales, trous, bosses, ...). La végétation a également été examinée, avec des mesures *in situ* de la hauteur de la litière en plusieurs endroits de la parcelle, ainsi que des charges sèche et humide. Des mesures en laboratoire ont également été réalisées à Bangkok, à Chiang Mai et à Marseille, pour déterminer les caractéristiques de combustibilité et d'inflammabilité des végétaux.

Les données de propagation n'ont cependant été exploitables que dans un seul des deux brûlages. On présente donc l'étude concernant une seule des deux parcelles.



Figure 32 : Brûlage de la première parcelle, non étudié.

La mesure de la propagation était basée sur l'observation. Les balises, clairement visibles par les membres de l'équipe de recherche positionnés de manière stratégique (Figure 34), servaient de points de passage chronométrés. On dispose ainsi du front de propagation à tout instant par interpolation entre deux points de passage sur une rangée.



Figure 33 : Analyse de gaz et de particules sur le terrain.



Figure 34 : En rose, les marqueurs fixés au sommet de bâtons alignés plantés dans le sol.

La parcelle était couverte d'une litière de feuilles, caractéristique d'une forêt de feuillus mixtes (tas : mixed deciduous forest (MDF)). Les incendies dans ce type de sous-bois mobilisent ainsi une litière composée d'une biomasse variée, comprenant principalement des feuilles. Comme on peut le voir Figure 33 et Figure 34, la faible charge et les vents quasi-nuls impliquent que ce type d'incendie soit de très faible intensité, avec de petites flammes et des vitesses de propagation lentes.

On présente dans le Tableau 11 les paramètres utilisés dans la simulation de ce brûlage dirigé. Ces propriétés sont celles des éléments fins (les feuilles), qui s'enflamment en premier et conditionnent la dynamique de propagation. Le réseau est de type amorphe polydisperse, selon une loi de distribution normale (diamètre moyen : 0.25 m, déviation : 0.04m).

Tableau 11 : Paramètres utilisés pour la simulation du brûlage de Chiang Mai. En gras, les paramètres déterminés par des mesures en laboratoire.

Résolution du MNT (m)	1	$m^{DFF''}$ (kg/m ²)	0.0098
U (m/s) (à 2.5 m du sol)	0.75	$m^{eau''}$ (kg/m ²)	0.0168
T_{∞} (K)	313	ρ^{DFF} (kg/m ²)	510
RH (%)	43	σ (1/m)	4664
Δt (s)	2	ε	0.6
Taux de couverture végétale	0.7	τ (s)	30
D (m)	0.25	Δh (MJ/kg)	13.600
H (m)	0.04	χ^r	0.4

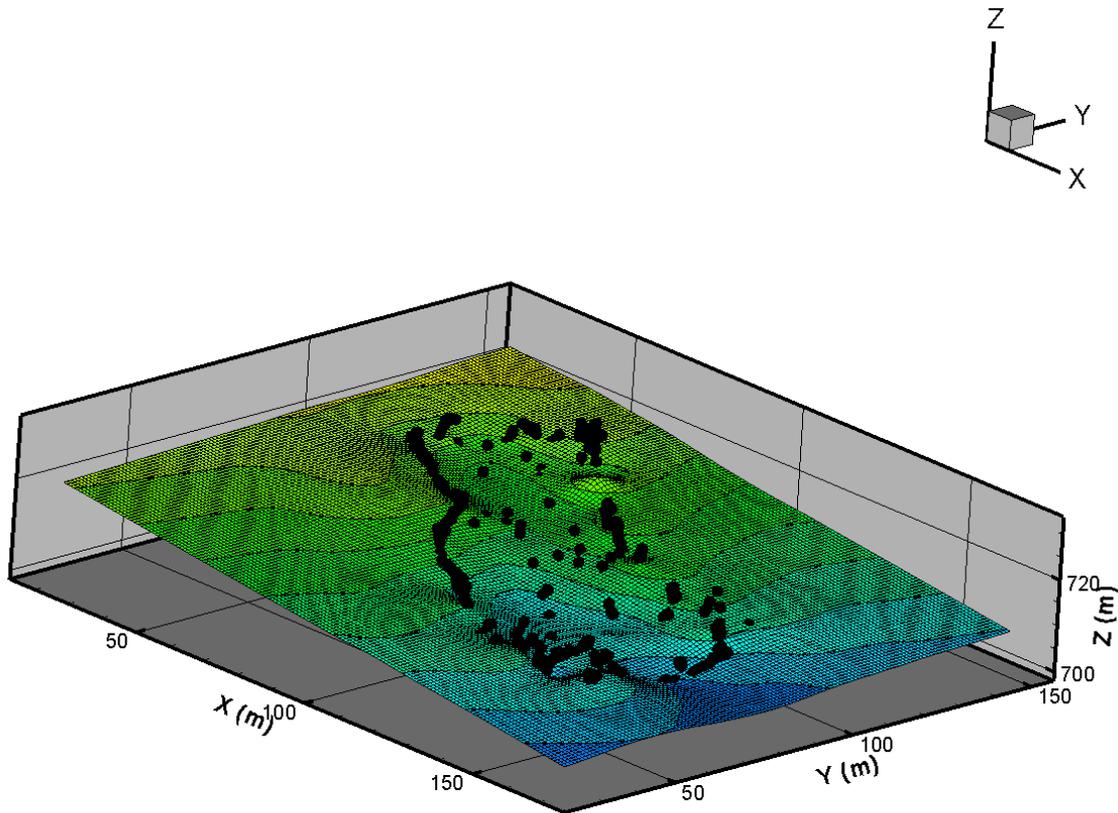


Figure 35 : Modèle numérique de terrain obtenu par interpolation des points GPS relevés sur le site du brûlage.

Le brûlage en lui-même concernait une parcelle d'une cinquantaine de mètres de large, pour une centaine de long. Un allumage en ligne a été effectué par une douzaine de techniciens, positionnés le long de la partie basse de la zone d'étude, afin que le feu se propage dans le sens de la pente. La végétation, assez éparse, présentait un couvert assez peu continu, avec un remplissage estimé à 70 %.

La propagation d'un bout à l'autre de la parcelle a duré environ une heure et demie. Les données météorologiques (température de l'air, humidité relative, intensité et direction du vent) ont été enregistrées à intervalles d'une minute. Les données relatives au vent, assez constantes tout au long de l'incendie, font état d'un vent mesuré à 2.5 m au-dessus du sol soufflant à 0.75 m/s à 117°N.

Les résultats de la simulation sont confrontés aux relevés expérimentaux de la propagation du feu sur la Figure 36. On peut constater que la forme du contour à 20 et 40 minutes n'est pas correctement restituée par la simulation, malgré une estimation globale de la vitesse de propagation satisfaisante. Dans la deuxième partie de la propagation, la forme du contour est qualitativement reproduite, tandis que la vitesse de propagation est, cette fois-ci, surestimée.

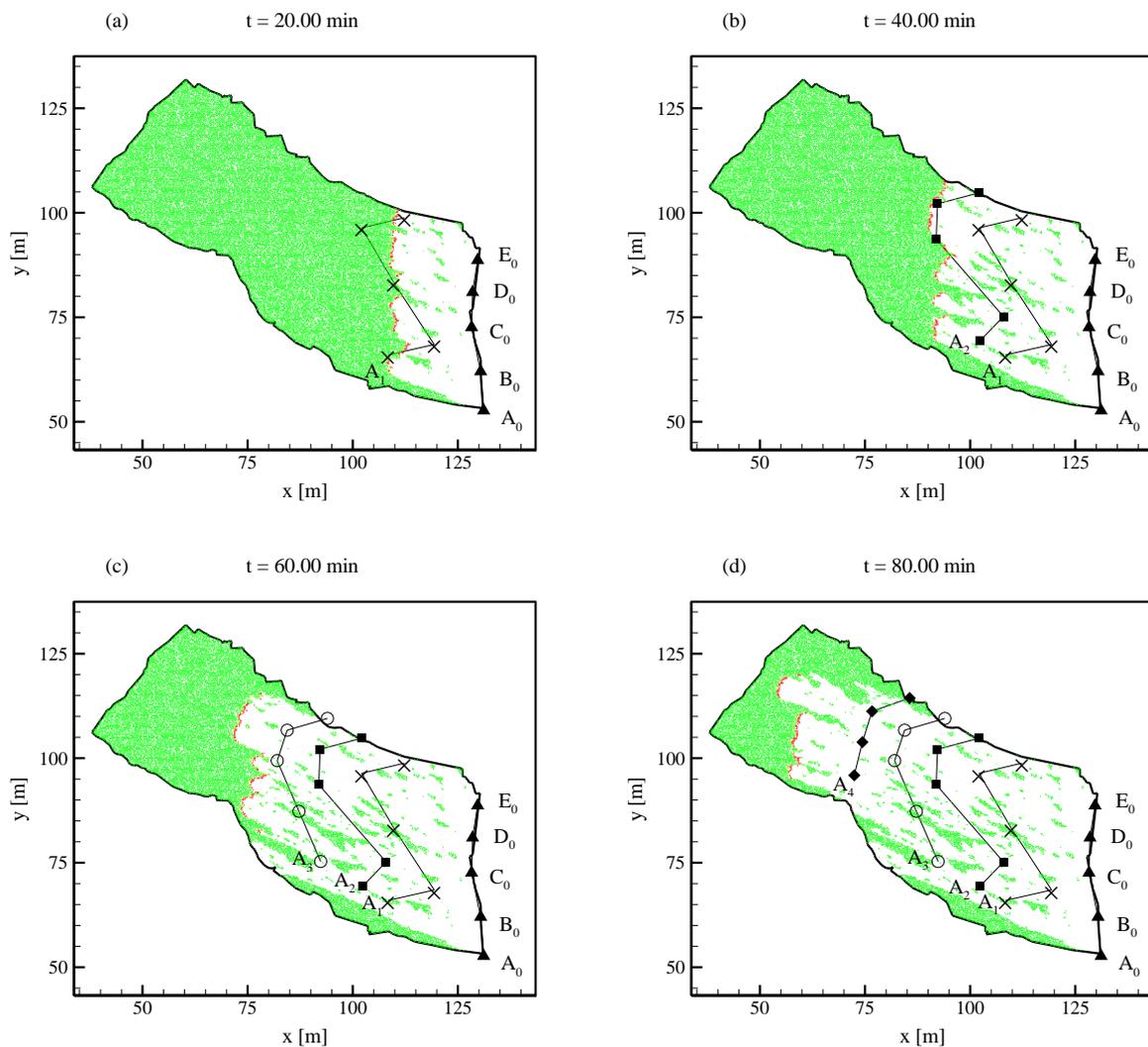


Figure 36 : Comparaison entre les contours simulés, en rouge, et les contours expérimentaux, représentés par des lignes avec des symboles associés à chaque instant de la propagation : \blacktriangle à l'instant initial, \times à 20 minutes, \blacksquare à 40 minutes, \circ à 60 minutes, et \blacklozenge à 80 minutes de propagation.

Les différences peuvent s'expliquer en grande partie par les hétérogénéités locales de la végétation, observées lors du brûlage mais non reproduites dans la cartographie numérique du

terrain. Une description plus fine de la répartition de la végétation aurait ainsi probablement permis une simulation plus fidèle. En effet, sur ce type de végétation à très faible charge, la propagation du feu est très sensible à la distribution de la végétation en raison des flammes, verticales et assez petites, qui n'impactent qu'une zone restreinte devant le front.

Néanmoins, la surface brûlée est qualitativement assez bien reproduite (Figure 37). La faible intensité du feu et le couvert végétal inhomogène mettent en exergue un effet du modèle de réseau, très représentatif des feux de végétation naturels, avec la présence d'amas de végétation imbrûlés. Cette caractéristique se retrouve dans les observations expérimentales (Figure 38).

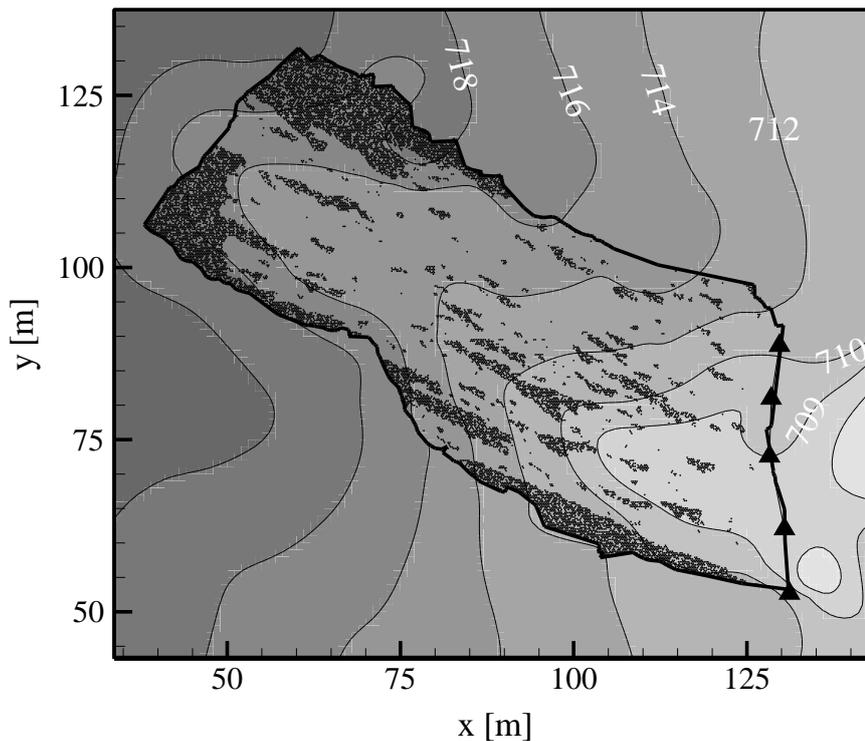


Figure 37 : Végétation imbrûlée à l'issue de la simulation. La présence d'amas imbrûlés est conforme aux observations expérimentales.



Figure 38 : Photo prise à la fin du brûlage, révélant des zones imbrûlées.

Malgré les différences observées, la validation du modèle dans ce cas où la propagation est pilotée par le rayonnement des flammes et des braises (la convection y est quasiment négligeable) est néanmoins satisfaisante. Le temps de calcul est de l'ordre de 35 secondes, c'est-à-dire 150 fois plus faible que le temps réel. Cela s'explique par la taille réduite du domaine d'étude, une propagation très lente et donc par le faible nombre de sites en feu à gérer au cours du temps.

4.2 Feu de Favone

Le feu de Favone qui a eu lieu le 8 juillet 2009 près du village de Favone, dans le sud-est de la Corse est un feu particulièrement bien documenté (Santoni et al., 2011). Le feu s'est déclaré à 15h, en bordure d'une zone qui avait été débroussaillée mécaniquement, et s'est propagé en direction de la mer jusqu'à l'atteindre à 16h15. On sait également que le feu a traversé une route, située en bordure de mer, aux alentours de 16h.

La tactique de lutte par les moyens terrestres et aériens a consisté à attaquer le feu par les flancs. Ces informations, ainsi que les données de végétation (charge, teneur en eau, type de végétaux) sont extraites des travaux de Santoni et al. (2011). Les données incluent également un modèle numérique de terrain de 50 m de résolution, ainsi qu'une carte de végétation. Le

vent local a été recalculé par le logiciel Flowstar© à partir d'un vent moyen donné par la station météorologique de Solenzara.

Tableau 12 : Paramètres utilisés pour la simulation du feu de Favone (2009). Les paramètres en gras proviennent de mesures en laboratoire.

Résolution du MNT (m)	25	$m^{DFP''}$ (kg/m ²)	2.682
U (m/s) (à 10 m du sol)	6	$m^{eau''}$ (kg/m ²)	1.582
T_{∞} (K)	303	ρ^{DFP} (kg/m ²)	720
RH (%)	42	σ (1/m)	5145
Δt (s)	1	ϵ	0.9
Taux de couverture végétale	0.91	τ (s)	30
D (m)	3	Δh (MJ/kg)	15.360
H (m)	3	χ^r	0.3

La Figure 39 montre la simulation de l'incendie en prenant en compte ou non les zones rendues inertes par les actions de prévention et de lutte. Ne disposant pas de données précises quant à la localisation de ces zones, il ne s'agit là que d'estimations basées sur la description du déroulement de l'incendie par Santoni et al. (2011). Dans le premier cas (Figure 39a), le front de flamme n'est altéré que par les zones d'habitations proches de l'incendie, qui sont non combustibles. L'analyse comparative des contours mesurés et calculés toutes les 15 minutes montre une bonne estimation des temps de passage de la tête de feu aux points B et D. On note que la vitesse moyenne prédite par le modèle entre les points A et B, sur la partie ascendante du terrain, est sous-estimée (16.3 contre 17.9 m.min⁻¹). La même tendance est observée entre les points B et C, sur la partie descendante du terrain, avec 14.4 m.min⁻¹ vs. 14.8 m.min⁻¹. Finalement, la vitesse est surestimée par le modèle entre les points C et D, où le terrain est plutôt plat (11.9 vs. 9.3 m.min⁻¹). On note néanmoins une forte surestimation de l'expansion latérale de l'incendie.

(a)



(b)

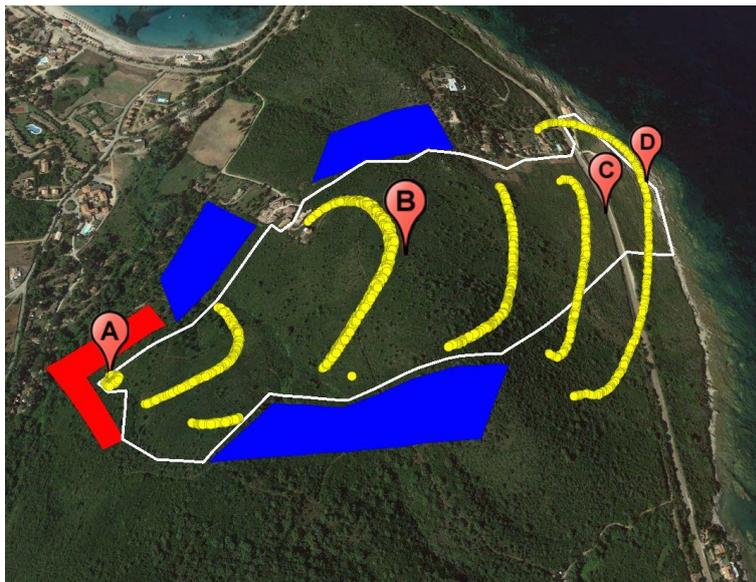


Figure 39 : Simulation du feu de Favone. Le point A est le point d'éclosion, le point B est la position du feu réel après 29 minutes de propagation, le point C est la position du front de flamme au bout d'une heure de propagation, et le point D au bout de 75 minutes. Les contours simulés (en jaune) sont affichés par intervalle de 15 minutes sans (a) et avec (b) prise en compte des zones supposées inertées par les actions de prévention et de lutte. Le contour réel est symbolisé par un trait blanc.

Dans la simulation donnée sur la Figure 39b, on a cette fois rendue inerte la zone débroussaillée située près du point d'inflammation (zone en rouge) et les zones supposées touchées par les actions de lutte sur les flancs du feu (zone en bleu). On constate que la

propagation de la tête de feu n'est pas affectée, avec toujours de bons temps de passage du feu aux points B à D. De plus, l'inertage des zones évoquées précédemment a permis de limiter considérablement l'expansion latérale du feu, donnant des contours calculés en meilleur accord avec ceux mesurés.

Sur ce feu réel dont la propagation a duré 1h15', le temps de calcul est de 44 secondes, ce qui est tout à fait acceptable d'un point de vue opérationnel.

4.3 East Peak Fire

La capacité du modèle à simuler un incendie de très grande ampleur nous a conduit à simuler l'East Peak Fire qui a eu lieu en 2013 dans l'état du Colorado, aux États-Unis. Après s'être déclaré le 19 juin suite à un impact de foudre et repéré près d'un ranch de Boy Scout aux alentours de 17h, au pied de l'East Spanish Peak, le feu est resté actif jusqu'au 9 juillet. Néanmoins, la phase de propagation à proprement parler n'a duré que quelques jours, avec 3680 hectares brûlés au 21 juin, 5250 hectares au 23 juin, pour une surface totale brûlée d'environ 5400 ha et une dizaine de bâtiments détruits. La lutte contre l'incendie a été rendue difficile par l'activité de plusieurs incendies qui se sont déroulés simultanément dans cette même zone du Colorado (en particulier le West Fork Complex Fire, second plus grand incendie en superficie cumulée du Colorado).

Bien qu'il n'existe pas d'étude ou de documentation quantitative sur cet incendie, il a été choisi en raison de la grande quantité de données SIG sur sa propagation (images satellitaires, polygones géo-localisés de contours de feu à plusieurs instants de la propagation), ainsi que d'indications sur son avancement et sur la lutte opérationnelle, notamment par les informations médiatiques.

Les contours géo-localisés donnent la position du feu à 11 instants, entre le 21 juin et le 27 juin. Pour la comparaison du modèle avec les observations, nous avons utilisé les contours du 21 et du 23, en bleu et en blanc sur la Figure 41. Comme nous l'avons indiqué précédemment, les points d'éclosion de cette simulation sont estimés, par regroupement d'informations entre les différents contours, les images satellitaires prises au cours de l'incendie (Figure 42) et les articles parus dans la presse et sur InciWeb. Le but est ici de se rapprocher d'une utilisation opérationnelle.

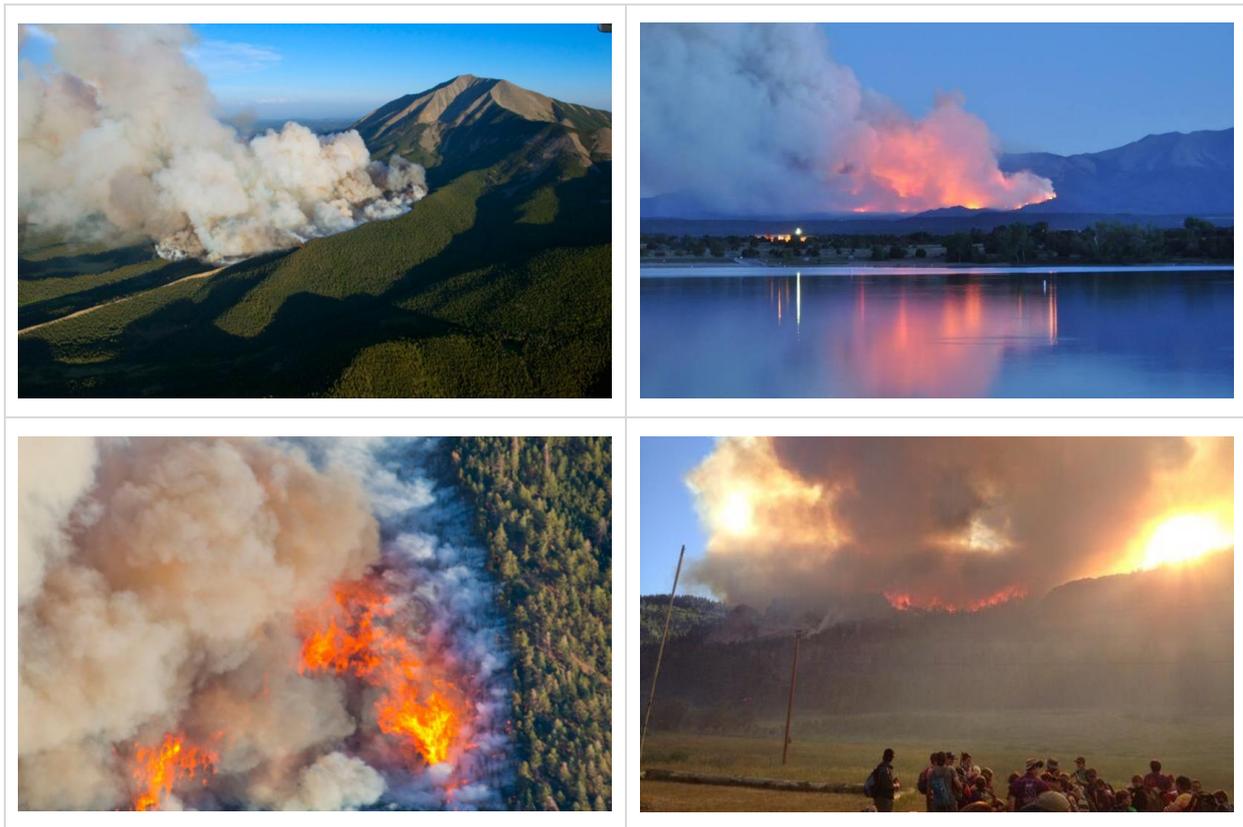


Figure 40 : Photos prises au cours du East Peak Fire.

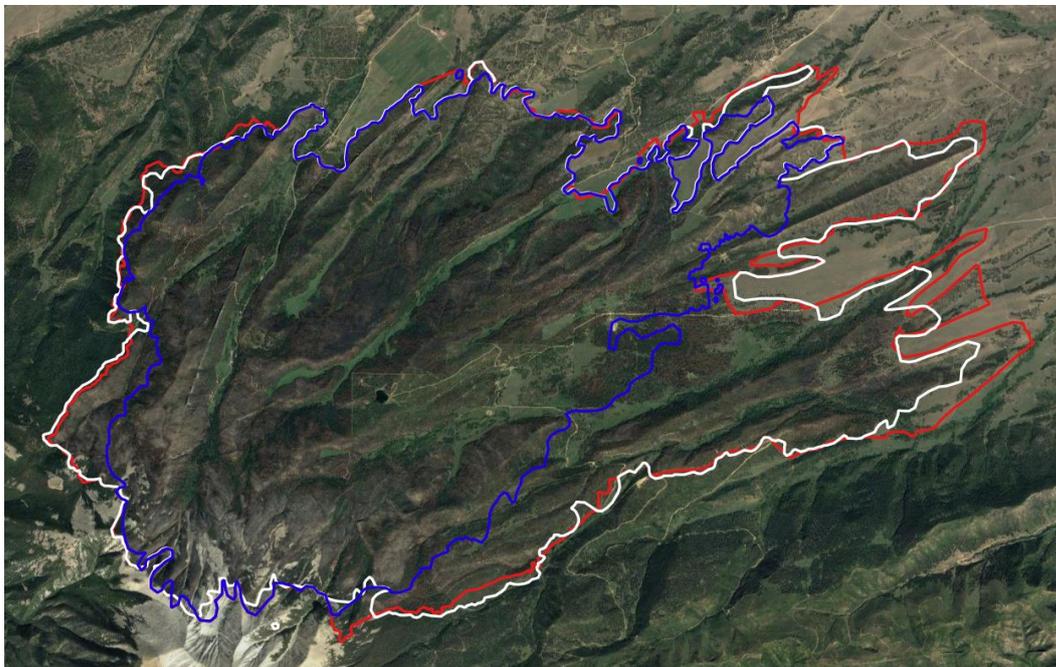


Figure 41 : Contours relevés le 21 (en bleu), le 23 (en blanc) et le contour final (en rouge). L'image satellite utilisée est une image de 2016, où apparaissent les vestiges de l'incendie.

La carte de végétation et le vent, actualisé toutes les heures, ont été fournis par NOVELTIS. La carte de végétation, de résolution 50 mètres, est obtenue par traitement d'images satellitaires, par un procédé éprouvé sur les végétations méditerranéennes permettant d'identifier un type de végétation *via* son émission proche infrarouge sur les images satellites. Le vent est restitué, à partir des données des stations météorologiques proches de l'incendie, par le modèle CALMET.

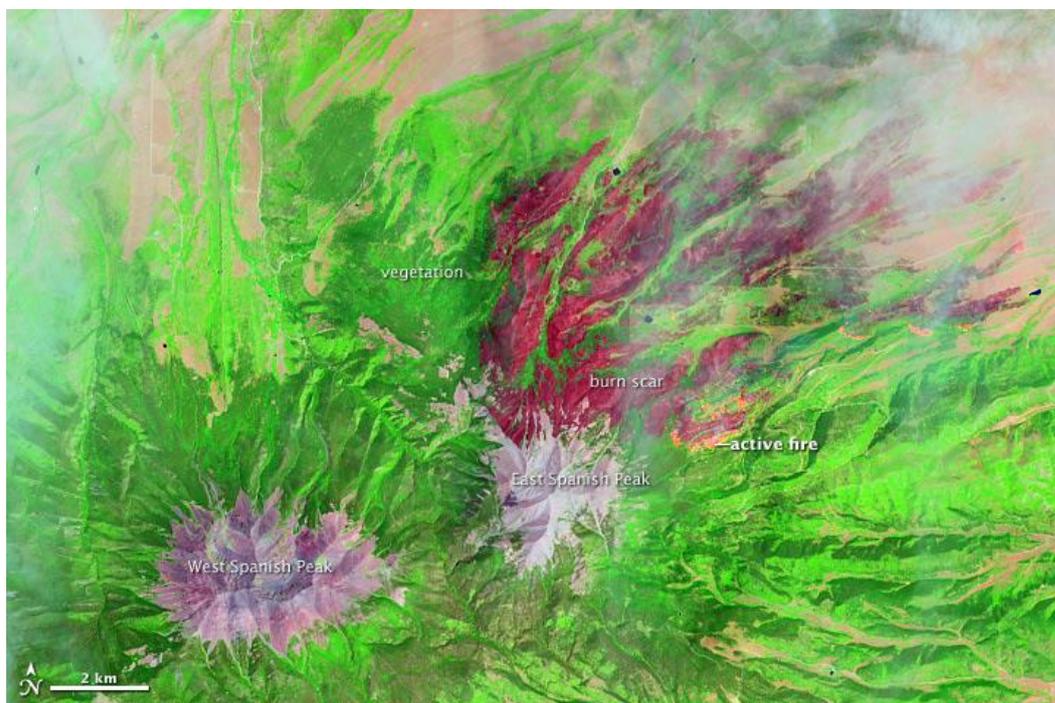


Figure 42 : Image en fausses couleurs de l'incendie, en date du 22 juin, publiée par la NASA. On y voit les surfaces brûlées par l'incendie (nuances violacées), les différents types de végétation (herbacées en vert clair, forêt en vert foncé), les zones de feu actives (orange) et les dégagements de fumées.

En raison de la végétation dominante de type forestière, on utilise, dans la classification d'Anderson, 1982, la typologie 4, décrivant un mélange de chaparral (une sorte de maquis formé par des buissons et des broussailles, Figure 43). Les propriétés utilisées lors de cette simulation sont répertoriées dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Paramètres utilisés pour la simulation du feu du East Peak Fire (2013). Les paramètres en gras proviennent de mesures en laboratoire.

Résolution du MNT (m)	50	m^{DFP} (kg/m ²)	3,21
U (m/s) (à 10 m du sol)	Local	m^{eau} (kg/m ²)	0,642
T_{∞} (K)	313	ρ^{DFP} (kg/m ²)	720
RH (%)	42	σ (1/m)	5145
Δt (s)	1	ϵ	0,9
Taux de couverture végétale	0,91	τ (s)	30
D (m)	3	Δh (MJ/kg)	15,360
H (m)	1,8	χ^r	0,3



Figure 43 : Photo de la végétation dans les environs du feu, prise en août 2012.

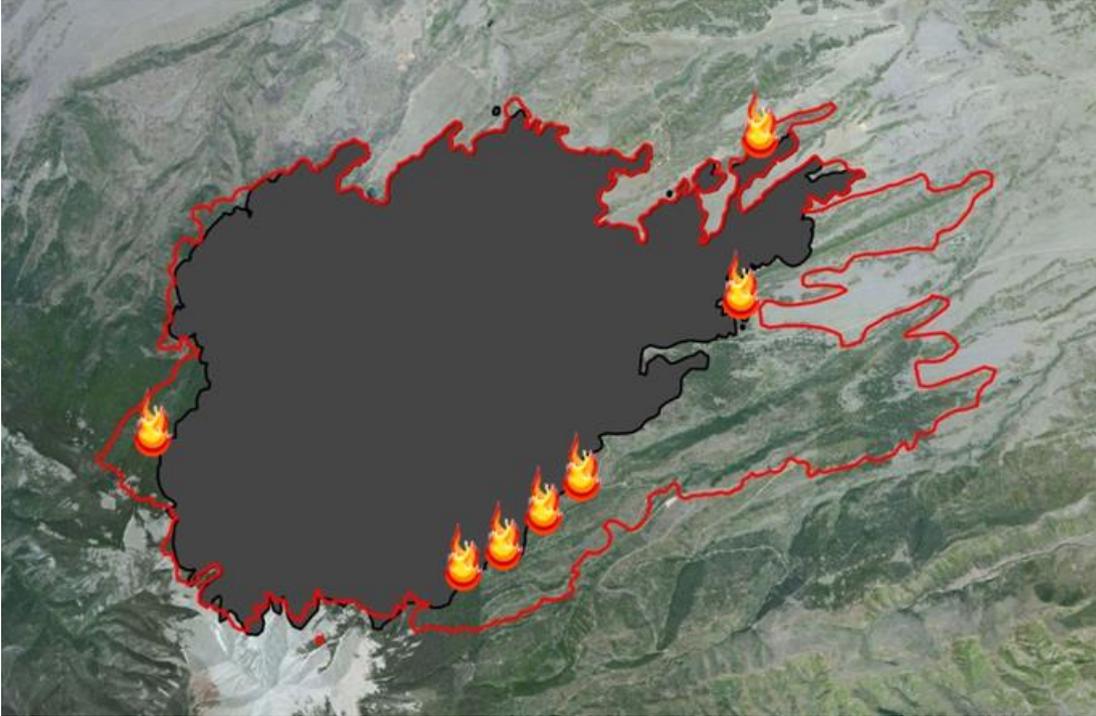


Figure 44 : Surfaces déjà brûlées le 21 juin et rendues inertes sur la carte de végétation en gris, contour du 23 en rouge. Les points d'éclosion sont symbolisés par des flammes.

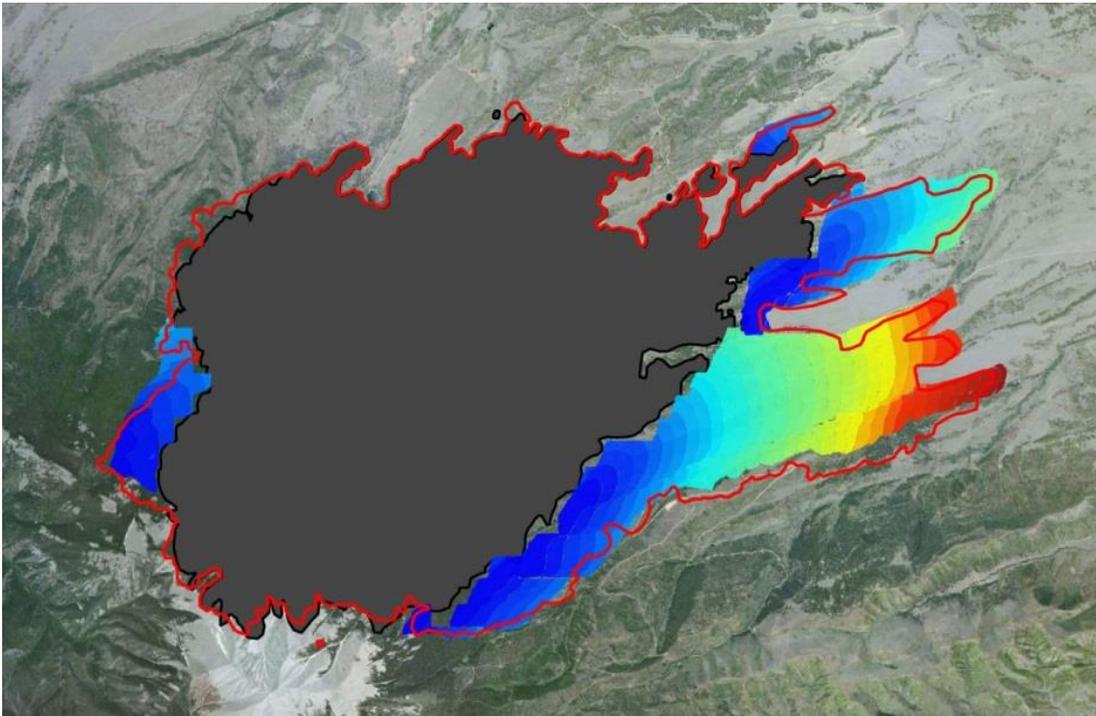


Figure 45 : En dégradé de couleur, la propagation simulée par le modèle.

Le feu est initié en 3 points d'allumage à l'ouest et au nord-est, ainsi que par une ligne discontinue d'allumage au sud (Figure 44).

On obtient une forme de l'incendie conforme au feu réel, notamment grâce au respect, dans la carte d'occupation des sols, des zones vierges de végétation. Néanmoins, ce contour est obtenu simplement au bout de huit heures de simulation, alors qu'il est daté du 23. Ceci s'explique par le fait que la végétation est très hétérogène et présente de fortes variations en termes de charge et de taux de couverture. La résolution de 50 mètres utilisée ne permet pas une prise en compte plus fine du couvert végétal, et limite donc la qualité des résultats. Il est à noter que cet essai de simulation a été effectué dans un délai assez court, à but essentiellement démonstratif, et que les développements et les corrections nécessaires pour affiner les résultats n'ont donc pas pu être faits, notamment en ce qui concerne la carte de végétation et les propriétés d'inflammabilité et de combustibilité des végétaux. Pour ces dernières propriétés, des études bibliographiques sur les végétaux nord-américains, plus spécifiquement ceux du Colorado, voire des expérimentations spécifiques auraient été nécessaires, ce qui pourra faire l'objet de travaux futurs.

Concernant ce qui a motivé cette simulation, à savoir éprouver les capacités du modèle d'un point de vue informatique, le temps de calcul sur 12 processeurs d'environ 600 secondes est inférieur de 50 fois aux huit heures de propagation du feu réel. Le domaine de calcul, comprenant la météo, le relief et la végétation sur une superficie de 65 par 65 km², a induit pour cette simulation un pic d'allocation mémoire à 2 Go environ.

5. PPRIF

5.1 Contexte

Avec l'urbanisation croissante, la problématique des incendies de forêt à l'interface forêt-habitat (tas : Wildland Urban Interface, noté ci-après WUI) devient centrale (Radeloff et al., 2005 ; Hammer et al., 2009). La multiplication des interfaces péri-urbaines entraîne de fait une augmentation du nombre d'habitations exposées au risque feu de forêt. L'interface habitat-forêt est donc un enjeu, mais aussi un facteur de risque incendie puisque les activités humaines présentes dans ces interfaces peuvent également constituer des sources potentielles de départs de feux.

En raison de l'ampleur du phénomène, qui touche toutes les parties du globe (Radeloff et al., 2005 ; Lampin-Maillet et al., 2010 ; Galiana-Martin et al., 2011 ; Bianchi et al., 2010 ; Vasquez et al., 2011), la mobilisation des communautés scientifiques – incendie, éco-biologie, sociologie – se fait de plus en plus forte, en écho à la tendance climatologique qui amène à une hausse du risque et du nombre d'incendies (Liu et al., 2010). La diversité des communautés concernées découle par ailleurs de la diversité des approches, interdépendantes, face à cette problématique. Son appréhension nécessite en effet d'étudier non seulement les mécanismes du feu, le comportement des végétaux et des matériaux qui y sont soumis (Cohen, 2000 ; Syphard et al., 2017), mais également l'environnement végétal naturel ou ornemental (Lampin-Maillet et al., 2010), ainsi que les comportements et les supports de diffusion pour la sensibilisation des personnes exposées au risque incendie (McCaffrey et al., 2012 ; Toman et al., 2014). Dans certains pays, en particulier les USA (Mell et al., 2010) et l'Australie (Haynes et al., 2010), les études sont très actives et les autorités très attentives. Les populations sont sensibilisées au risque incendie car très régulièrement exposées, causant chaque année des évacuations de plus ou moins grande ampleur et des dégâts matériels et humains considérables. Ces pays sont particulièrement concernés en raison de la configuration de leur territoire. En prenant l'exemple des États-Unis, les zones considérées comme zone d'interface couvrent 9.4% du pays et regroupent près de 40 % des logements (Radeloff et al., 2005). En revanche, les pays concernés en Europe par les incendies de forêt aux interfaces, et tout particulièrement la France, ont été jusqu'à présent moins actifs face à ce risque.

Les réglementations françaises en matière de résistance au feu des matériaux actuels sont effectuées sur la base de normes réalisées pour des feux compartimentés, ce qui est très évocateur du fait que peu d'études spécifiques aux incendies de forêt aux interfaces soient menées en France dans les organismes étatiques. Bien que des réglementations en matière de limitation et d'entretien du couvert végétal entourant une habitation existent (débroussaillage à 50 mètres, quelques fois 100 m, autour de la maison), elle n'est pas systématiquement appliquée dans les faits. La quasi absence de grands incendies entre 1998 et 2016 dans la région provençale ont en effet mis le danger entre parenthèses et, paradoxalement, a augmenté le danger potentiel en raison de l'accumulation de combustible. De récents incendies ont cependant rappelé à tous le danger que représentent les feux de forêt, avec près de 4000 hectares brûlés tout autour de l'Étang de Berre durant l'été 2016.

L'inflammation d'une structure exposée à un incendie de forêt est conditionnée dans son ensemble par l'énergie convective et radiative (Cohen, 2004 ; Parent et al., 2010) qui l'impacte (fonction de la distance et de la configuration géométrique), par les matériaux dont elle est constituée, et, le cas échéant, par l'action des brandons (Sardoy et al., 2008) qu'elle reçoit. Face à ce constat, il a été établi que le moyen le plus efficace pour limiter les dégâts serait de réduire le potentiel d'inflammabilité et de combustibilité de la structure (Cohen, 2010 ; Mell et al., 2010), comme cela s'impose déjà aux constructions Californiennes (Lien 2). Néanmoins, si c'est applicable en théorie sur des constructions nouvelles par l'utilisation de matériaux adaptés, comme par exemple ceux testés par le laboratoire CSIRO, en Australie (Liens 3 et 4 ; Syphard et al., 2017), la limitation se trouve dans les coûts de fabrication et l'esthétique de la construction, tout en n'étant pas forcément adaptable à des constructions existantes. Limiter les éléments très inflammables (abris de jardin en plastique, végétation ornementale, etc.) tout autour de la maison est néanmoins une action préventive simple qui limite le risque.

En dehors de ces études sur la résistance des matériaux, les études liées aux WUI portent plus classiquement sur le management de la végétation pour limiter le risque incendie (Finney et Cohen, 2003 ; Stratton et al., 2004), tandis que de récents articles indiquent que c'est un ensemble de paramètres qui, combinés, conduiraient à la sécurité des biens et des personnes (Calkin et al., 2014 ; Moritz et al., 2014), intégrant notamment la notion d'espace défendable par les habitants qui y sont préparés (Haynes et al., 2010).

Le recours à des outils de simulation est néanmoins nécessaire pour pouvoir appréhender au cas par cas le risque incendie auquel est soumise une structure. Les codes de propagation classiques et largement répandus, comme FARSITE (Stratton et al., 2004) ou

FIRESTAR (Guijarro et Valette, 2002), peuvent être utilisés comme outil d'estimation de l'efficacité de l'aménagement de la végétation (Massada et al., 2009), mais leur caractère 2D ne peut en aucun cas permettre d'évaluer l'impact du passage du feu au voisinage d'une structure. Des codes 3D sont plus à même de fournir des données intéressantes dans cette discipline (Porterie et al., 2007 ; Billaud et al., 2011). Des développements ont été réalisés en ce sens par le NIST afin de disposer d'un outil de calcul adapté aux feux naturels impactant une structure (Evans et al., 2003, 2004a, 2004b). Néanmoins, les modèles physiques de ce type nécessitent une grande quantité de données, ce qui pénalise leur application à grande échelle.

L'intérêt de modèles moins complets et nécessitant donc moins de paramètres réside donc dans leur facilité d'application. A l'heure actuelle, quelques modèles sont compatibles avec une application souple et suffisante en termes d'évaluation de distances de sécurité pour les personnes et pour les biens. Concernant les distances de sécurité, pour les personnels de lutte opérationnelle notamment, un outil basé sur la règle générale définissant la distance de sureté comme étant égale au minimum à quatre fois la longueur de la flamme, a été développé tout récemment par Bisgambiglia et al., 2017. Il combine le modèle de propagation de Balbi et al., 2007 à un sous-modèle de longueur de flamme et a été mis en ligne sous la forme d'un service web, qui permet ainsi, à condition de disposer de cartes et de modèle de végétation, d'obtenir des distances de sécurité en fonction des conditions de la zone d'étude. Destiné à l'élaboration de coupure combustible de manière précise, on peut imaginer une application à une gestion de l'environnement végétal de structures à une interface forêt-habitat.

Un modèle 3D, développé au CSIRO (Siggins et al., 2013), permet cette fois d'estimer le flux de chaleur rayonné sur des habitations situées à une interface. C'est un modèle statique qui peut s'appuyer sur un modèle de propagation 2 ou 3D (RapidFire dans l'étude citée) pour reconstituer la géométrie de fronts de flammes à différents instants. L'équipe du SCIRO a utilisée des données LiDAR pour reconstituer les cibles en 3 dimensions. De manière originale, le facteur de vue est calculé par émission, à partir des cibles (des corps noirs sphériques), de multiples rayons explorant de manière uniforme tout l'hémisphère exposé au front de flamme. A la manière des facteurs de vue utilisés dans les abaques présentés dans ce manuscrit, le facteur de forme entre le front de flamme et la cible est donc le rapport entre le nombre de rayons qui touchent les flammes et le nombre total de rayons.

5.2 Plan de Prévention des Risques d'Incendies de Forêts (PPRIF)

Dans le contexte des feux de forêt aux interfaces péri-urbaines, et plus précisément des Plans de Prévention du Risque Incendie de Forêt (PPRIF)⁶, nous avons développé un outil permettant d'évaluer les sollicitations thermiques auxquelles une structure d'habitation pourrait être exposée. A terme, cela devrait déboucher sur des mesures constructives pouvant être prescrites dans les PPRIF (Lien 5).

5.2.1 Adaptation du code de propagation

L'efficacité du débroussaillage autour d'une habitation est évaluée à l'aide du modèle de propagation utilisant la méthode directe de Monte Carlo.

A ce stade de développement, les habitations sont représentées par un assemblage de parois de forme parallélépipédique, chacune d'elles étant référencée par 3 points de l'espace renseignés par l'utilisateur. La surface de chaque paroi est maillée afin d'évaluer finement la répartition du flux reçu par la structure.

Les échanges convectifs entre les gaz chauds poussés par le vent et les parois sont pris en compte pour chaque maille (ii, kk) des parois. On calcule tout d'abord le vent à hauteur de la maille (ii, kk) de la paroi considérée, par la corrélation de Justus et Mikhail (1976) :

$$U_{maille}^{cible} = \min \left[U_{ref}; U_{ref} \left(\frac{z_{maille}}{z_{ref}} \right)^{\frac{1}{7}} \right] \quad (37)$$

où U_{ref} est la vitesse du vent connue à la hauteur z_{ref} , et z_{maille} est l'altitude du centre de la maille (ii, kk) . Un coefficient d'échange convectif $h_{maille}^{cible}(i)$ est ensuite calculé en fonction de la distance $d_{i,maille}$ entre le site en feu i et la maille de la paroi impactée :

$$h_{maille}^{cc}(i) = 0.037 \frac{k_{T_{\infty,f}}}{d_{i,maille}} \left(\frac{U_{maille}^{cible} d_{i,maille}}{\nu_{T_{\infty,f}}} \right)^{0.8} Pr^{1/3} \quad (38)$$

L'échange de chaleur convectif est finalement calculé comme suit :

$$q_{i,maille}^{cc} = h^{cc}(T_i^f - T_{maille}) \exp \left(- \frac{d_{i,maille}}{3.33L_i^f} \right) \quad (39)$$

⁶ Le PPRIF constitue le dispositif de base de la prévention puisqu'il permet de contrôler le développement de l'urbanisation dans les zones exposées au risque incendie, et de prescrire des mesures de prévention, protection, de réduction de la vulnérabilité et de la sauvegarde.

La température en chaque point de la paroi, thermiquement épaisse et multicouche est calculée par un module de conduction 1D. Les conditions aux limites incluent, côté exposé, les flux convectif et radiatif, ainsi que le refroidissement radiatif, et, côté opposé, le flux convectif et le refroidissement radiatif avec l'environnement. On suppose que la paroi s'enflamme lorsque sa température en un point dépasse la température d'inflammation pilotée du matériau qui la constitue. L'inflammation est donc supposée être pilotée par la flamme elle-même (contact direct) ou par les brandons émis depuis le front de flammes.

5.2.2 Configurations étudiées

Les discussions avec l'Office National des Forêts (ONF) ont permis d'établir quelques scénarios de feu, listés dans le Tableau 14 et représentatifs de ceux qui touchent la région méditerranéenne. On considère ainsi des zones débroussaillées de 30 ou 50 mètres, sans pente ou avec une pente ascendante de 30% dans le sens de propagation du feu, avec un vent de 30 ou 50 km/h. Concernant le couvert végétal, on considère dans la zone non débroussaillée un peuplement dense de pin d'Alep, avec une charge de 20 ou 40 tonnes/hectare et une teneur en eau de 30 %. Dans la zone débroussaillée, on considère dans tous les cas un peuplement aléatoire de pin d'Alep, séparés chacun au minimum de 3 mètres, à 3 mètres du bâtiment.

Tableau 14 : Description et numérotation des configurations étudiées.

Zone débroussaillée de 30 m	Sans pente	Vent 30 km/h	20 t/ha	1
			40 t/ha	2
		Vent 50 km/h	20 t/ha	3
			40 t/ha	4
	Pente de 30 %	Vent 30 km/h	20 t/ha	5
			40 t/ha	6
		Vent 50 km/h	20 t/ha	7
			40 t/ha	8
Zone débroussaillée de 50 m	Sans pente	Vent 30 km/h	20 t/ha	9
			40 t/ha	10
		Vent 50 km/h	20 t/ha	11
			40 t/ha	12
	Pente de 30 %	Vent 30 km/h	20 t/ha	13
			40 t/ha	14
		Vent 50 km/h	20 t/ha	15
			40 t/ha	16

Dans le cadre de cette thèse, seuls les développements d'un point de vue informatique ont été effectués, et les résultats présentés le sont à but démonstratif. L'étude complète sera l'objet de publications ultérieures.

Pour illustrer les configurations à étudier, la Figure 46 montre un terrain avec une zone débroussaillée de 30 mètres, sans pente, avec un vent de 30 km/h et une masse végétale de 40 t/ha (configuration 2 du Tableau 14). La teneur en eau est de 30%, et les sites combustibles ont un diamètre de 4 m. Le pas de temps retenu est de 0,2 s.

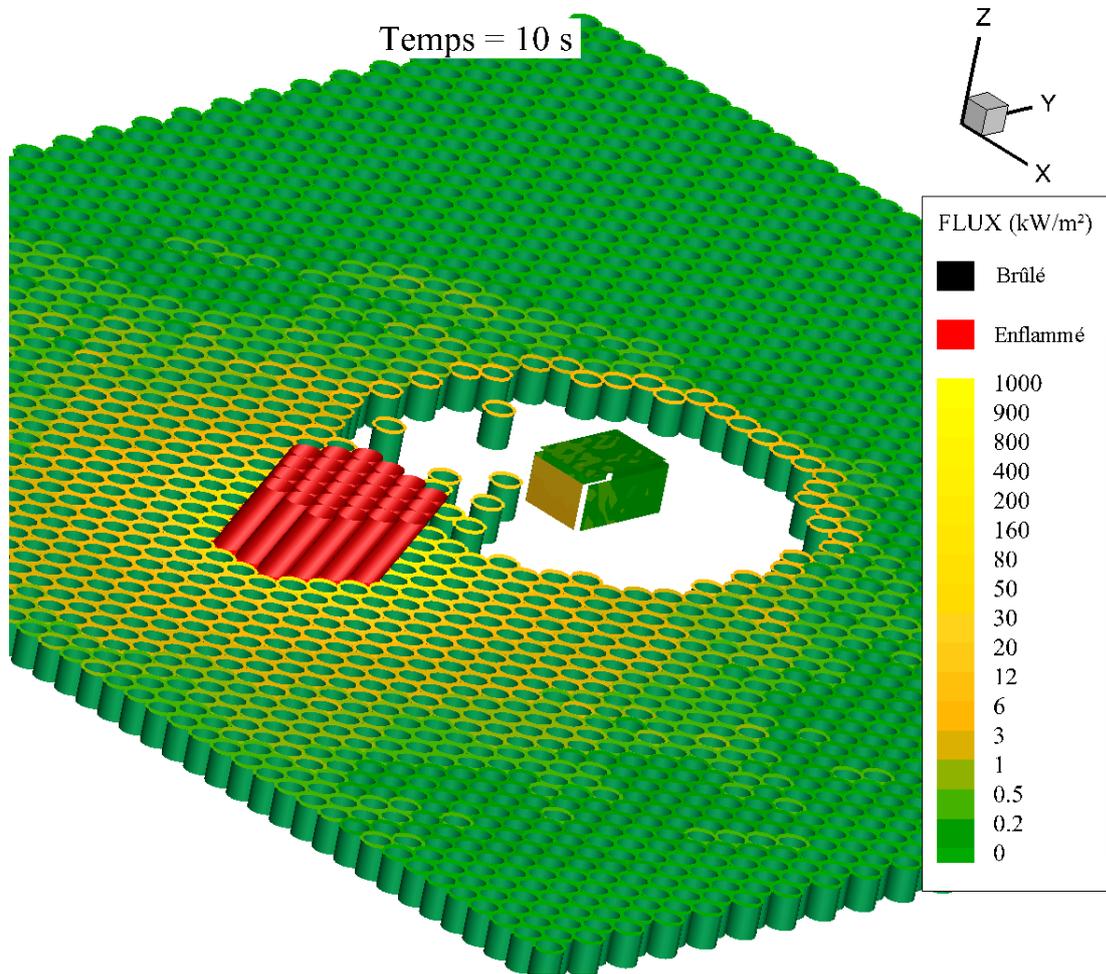


Figure 46 : Simulation type PPRIF, avec une zone débroussaillée de 30 mètres, sans pente.

Pour ce cas test, les parois de la maison modélisée ont des propriétés assimilées à celle du bois léger, raboté et étuvé (de type sapin ou épicéa), et figurent en Tableau 15.

Tableau 15 : Propriétés utilisées pour le calcul des températures des parois.

Epaisseur (cm)	3
Conductivité thermique (W/m/K)	0,14
Masse volumique (kg/m ³)	500
Capacité calorifique (J/K)	2500
Emissivité (-)	0,9
Température d'inflammation (K)	573

Des illustrations de la simulation d'une durée de 100 s sont présentées en Figure 47.

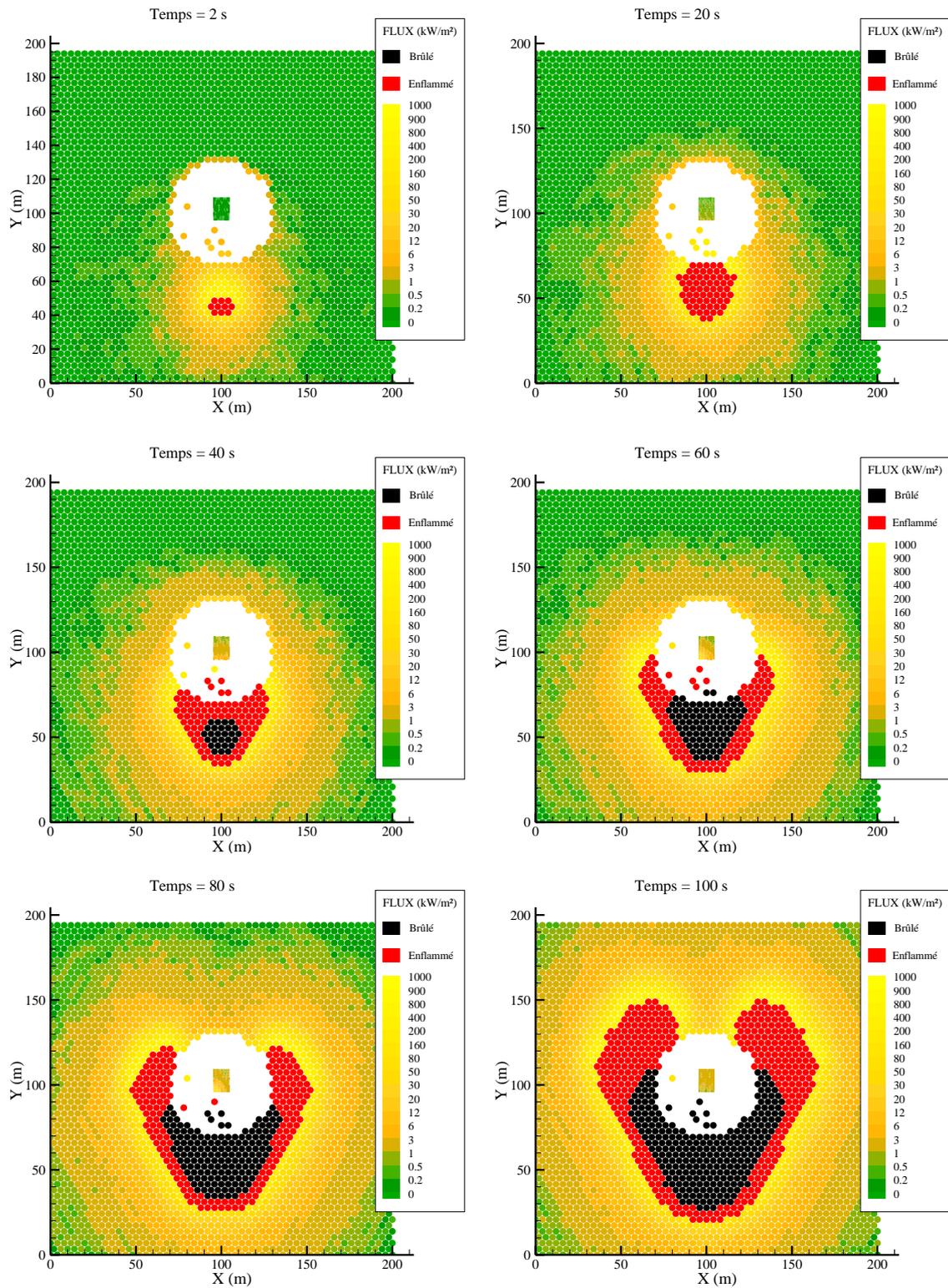


Figure 47 : Propagation 2D de l'incendie autour de la zone déboisée sur une période de 100 s.

De cette simulation, on peut retenir quelques observations utiles pour un plan de prévention du risque incendie.

Dans cette configuration qui présente une charge végétale élevée, la face avant, qui est soumise à la fois au rayonnement de la flamme et à la convection des gaz chauds poussés par le vent, monte très rapidement jusqu'à la température d'inflammation (Figure 48).

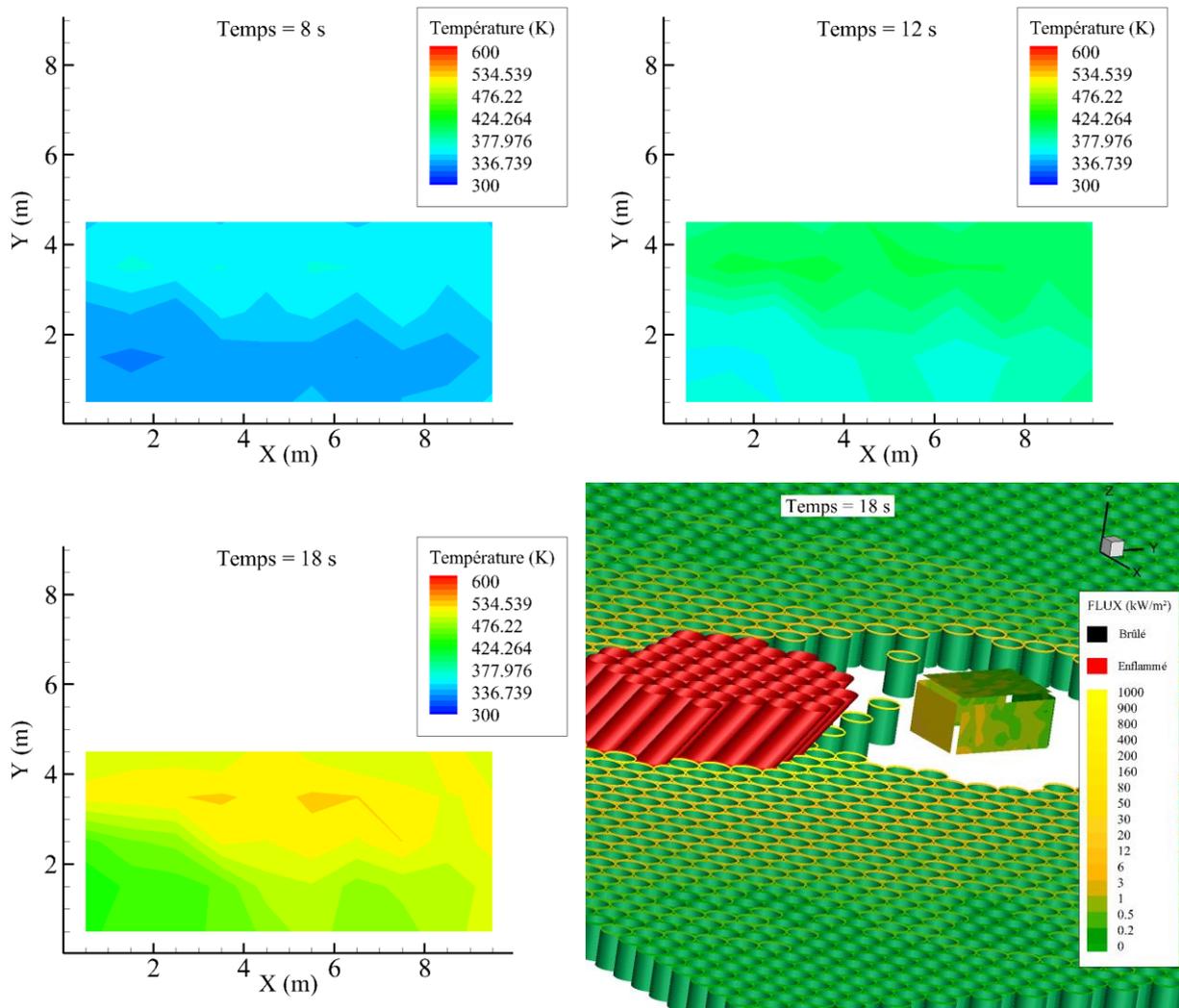


Figure 48 : Évolution de la température de surface de la paroi qui fait face au feu. La figure 3D en bas à droite montre la configuration qui précède le moment où la paroi atteint la température d'inflammation, qui a lieu à 19 s.

On constate également que la partie basse gauche, sur les figures présentées, chauffe moins rapidement en raison de la présence de sites végétaux qui écrantent le rayonnement et la convection. La température d'inflammation est atteinte sur la partie droite, sur la partie haute, plus exposée au rayonnement.

L'effet de la végétation intercalée entre le feu et le bâtiment est un deuxième élément notable de cette simulation. Si dans un premier temps elle écrante et abrite en partie la paroi face au front de flamme, elle est responsable de l'inflammation de la paroi située sur le dessus du bâtiment (Figure 49).

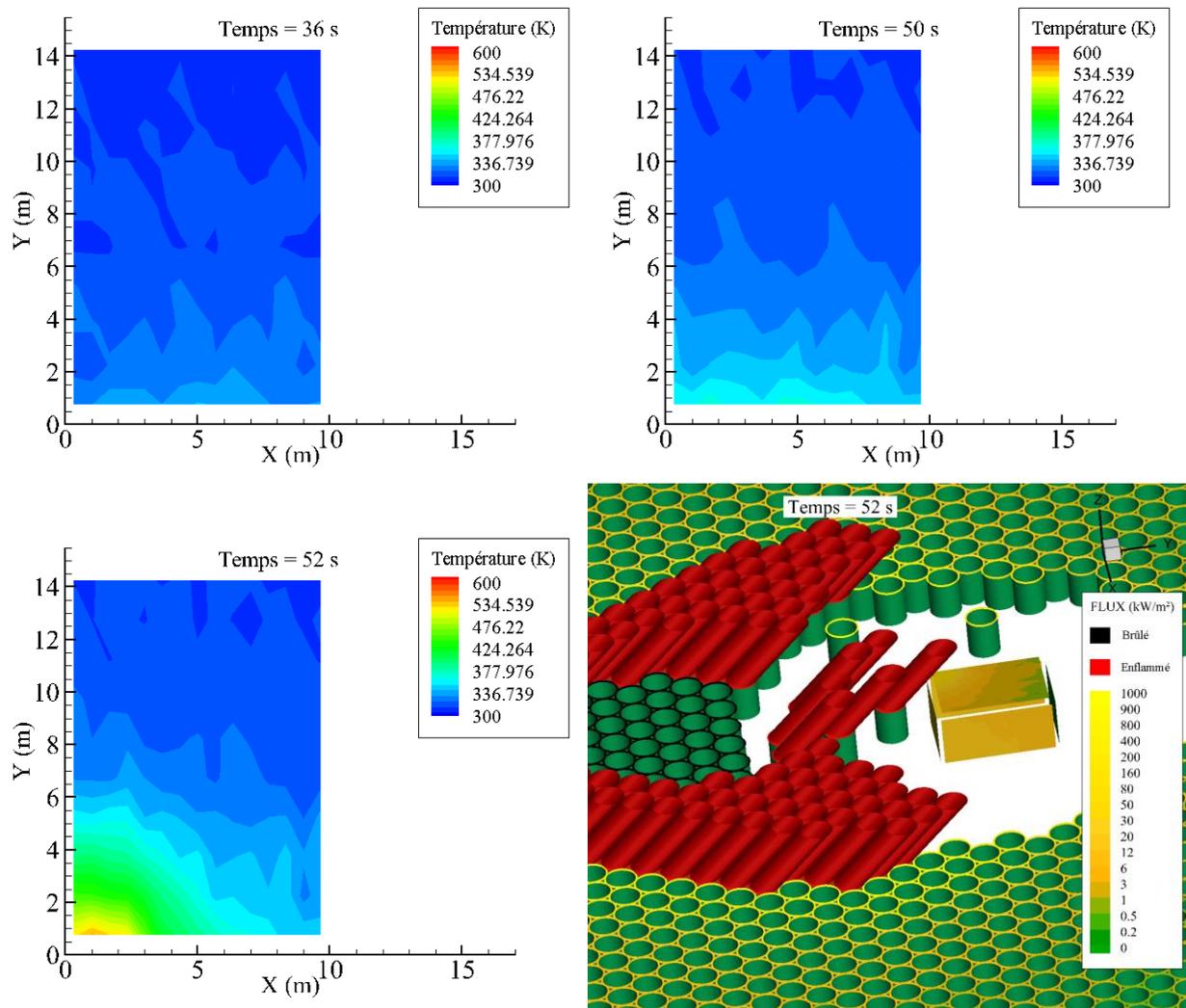


Figure 49 : Évolution de la température de surface de la paroi horizontale. La figure 3D en bas à droite montre la configuration qui précède le moment où la paroi atteint la température d'inflammation, qui a lieu à 54 s.

On retrouve donc les avantages et inconvénients de la végétation décorative : elle permet de protéger l'habitation en écrantant les flux thermiques, mais lorsqu'elle est atteinte par le feu, c'est une menace d'autant plus grande qu'elle est proche. La condition de distance arbre-maison minimale de 3 m est donc insuffisante dans ce cas de simulation. La problématique est d'autant plus sensible qu'il est difficile de faire respecter les obligations de déboisement (l'entretien de la végétation nécessite du temps, de l'énergie ou présente un coût non négligeable). Des solutions sont explorées, notamment en caractérisant l'inflammabilité des espèces ornementales, afin de fournir un guide aux habitants de zones sensibles (Ganteaume et al., 2013a, 2013b).

6. TECHFORFIRE

6.1 Contexte

L'objectif du projet TechForFire II est de développer un service d'astreinte pour l'aide à la lutte tactique contre les incendies de forêt. Ce service s'adresse en priorité aux centres opérationnels nationaux et internationaux de gestion de crise (SDIS, CODIS, COZ, COGIC...). Il s'interface aisément avec les systèmes de services d'information et d'alerte à la population, de gestion de réseaux (e.g. autoroutiers, ferroviaires, électricité, télécoms), et des opérateurs utilisant ces réseaux.

Le service TechForFire fournit en continu une information synthétique, intégrée et la plus complète possible qui inclut (a) une cartographie de l'état actuel de la gestion de l'incendie (positions précises du contour des feux, des forces engagées, des réseaux...), et (b) des prévisions opérationnelles des risques, tous les quarts d'heure pour les heures suivantes (jusqu'à six heures), avec une évaluation continue des zones sensibles et vulnérables, à défendre suivant différentes priorités. Le service peut se baser sur la surveillance de la situation actuelle du feu (moyens aériens, forces terrestres), les prévisions de l'évolution du feu qui sont faites en continu et qui sont réactualisées en fonction de l'évolution de la situation actuelle de l'incendie et des actions de lutte (e.g. actions des forces au sol et aériennes engagées dans la lutte), et sur le couplage de ces informations avec les localisations des éléments d'intérêt (habitations, zones urbaines, réseaux, industries, forces engagées...). Le service TechForFire remplace donc et complètera plusieurs fonctions d'aide à la décision actuellement assurées par divers outils distincts, et ne nécessite pas d'installation logicielle chez les utilisateurs.

Le caractère innovant du projet réside dans le couplage de technologies d'acquisition temps réel de données (imagerie aéroportée, données terrestres) fournissant des observations sur les zones actives du feu avec de la modélisation de propagation du feu, et la fourniture d'une information synthétique d'aide à la décision. La modélisation des risques présente l'intérêt d'être réactualisée en continu par les observations des zones actives de feu et par des données précises sur l'environnement étendu de la zone d'intervention (contour de feu, localisation des actions d'inertage de zones, météo fine échelle de la zone, paramètres de la végétation...).

Pour atteindre les objectifs fixés dans le cadre de ce projet, la société NOVELTIS, porteuse du projet et spécialisée dans le développement d'applications environnementales et leur valorisation dans des systèmes opérationnels d'aide à la décision, notamment auprès des agences spatiales, a monté un consortium regroupant SAGEM, le SDIS 13 (Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches du Rhône), NOVELTIS et l'IUSTI.

En effet, NOVELTIS s'est associée à la société SAGEM, spécialiste des systèmes optroniques aéroportés, afin d'exploiter opérationnellement et en temps-réel le potentiel de l'imagerie vidéo aérienne haute définition pour la surveillance des feux et l'extraction automatique, précise et géolocalisée des contours. Par ailleurs, NOVELTIS s'est appuyé sur les compétences de l'IUSTI (Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels), expert dans la modélisation et la simulation numérique des incendies, pour assurer l'opérationnalisation du modèle de propagation du feu dans un contexte temps réel. Enfin, et pour que le service TechForFire soit le mieux adapté aux besoins des utilisateurs, le SDIS 13 est un partenaire du projet. Il participe à la spécification du service, aux campagnes d'expérimentation et la validation du service. Il met également à disposition du projet ses moyens d'aérosurveillance et son expertise de terrain.

La réalisation de TechForFire II s'est effectuée sur 3 ans. Les bénéfices sociétaux sont primordiaux tant pour la réduction des surfaces boisées détruites par les incendies, que pour la protection des biens et des personnes situés à proximité de ces zones à risques, et pour la réduction des sommes allouées à la réparation des dégâts consécutifs aux feux de forêt.

Les objectifs de TechForFire II répondent en tous points à ceux du Pôle RISQUES, labellisateur de ce projet, à savoir, l'harmonisation des systèmes d'information pour la surveillance environnementale et la gestion des risques.

La Figure 50 représente l'organisation des lots de travail dans le Projet, *i.e.* *Work Packages* (WP), ainsi que la répartition des travaux entre les Partenaires impliqués dans chaque Work-Package.

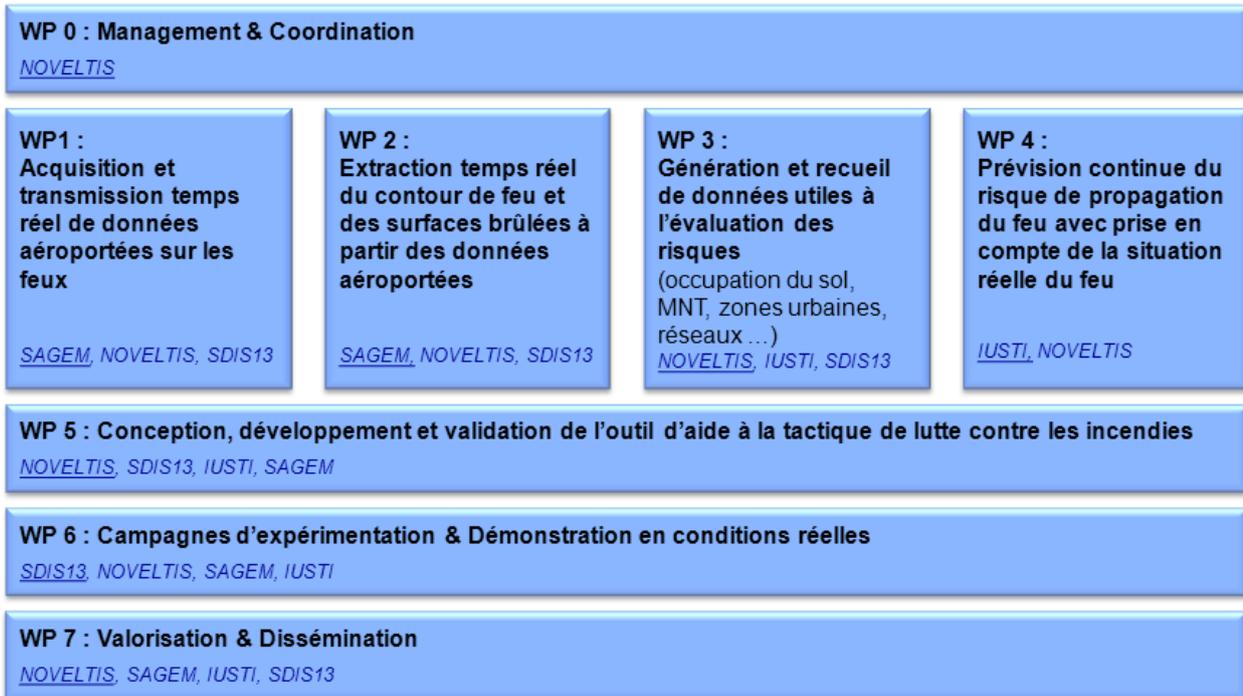


Figure 50 : Description et répartition des lots de travail du projet TechForFire

Ce travail de thèse a donc contribué à la réalisation des tâches WP3 à WP7.

La chaîne opérationnelle est décrite sur la Figure 51.

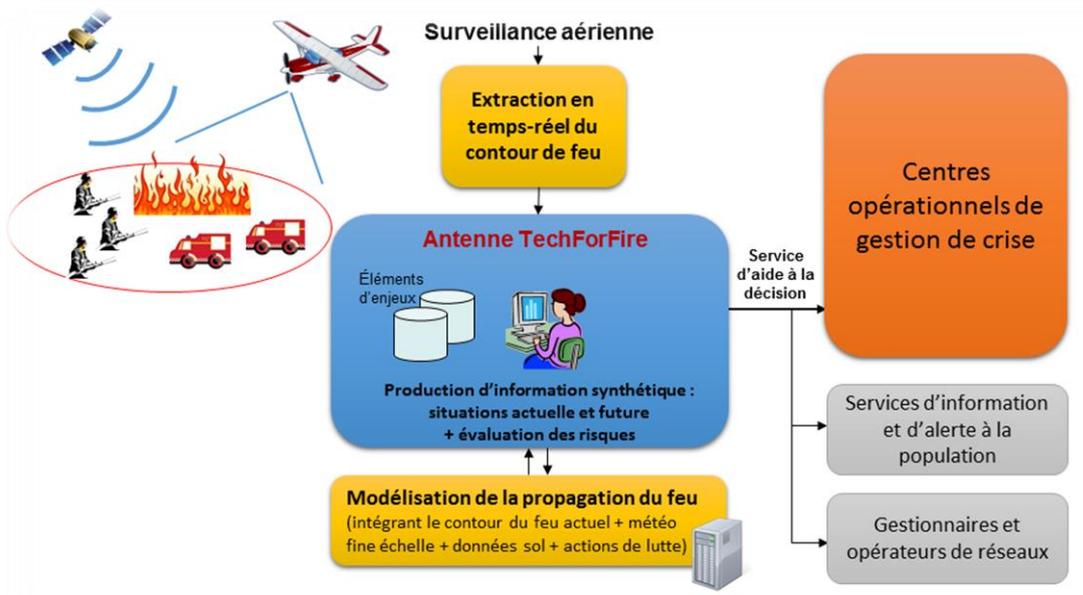


Figure 51 : Chaîne opérationnelle du service TECHFORFIRE

6.2 Développements effectués dans le cadre de T4F

Des développements spécifiques ont été effectués sur le modèle de propagation afin d'atteindre les objectifs du projet, notamment son caractère opérationnel. Ces développements concernent notamment l'optimisation du modèle en termes de temps CPU ainsi que l'interfaçage du modèle de propagation aux autres modules du projet (carte d'occupation des sols, cartographie du vent, actions de lutte).

6.2.1 Optimisation du temps de calcul

Le point dur principal a été de rendre le modèle suffisamment rapide pour atteindre l'objectif fixé, soit 6h de prévision toutes les 15 minutes. Le chapitre 3 de ce manuscrit décrit une partie de ces développements, en ce qui concerne les bases de données radiatives, l'utilisation du suivi d'interface, ainsi que les opérations d'optimisation d'un point de vue informatique.

Par ailleurs, l'utilisation du réseau amorphe pour certains types de végétation, a également fait partie des points d'optimisation. En effet, la génération d'un tel réseau peut prendre du temps lorsque le taux de remplissage requis est élevé. Comme nous l'avons évoqué au paragraphe 3.2, une méthode de pré-génération de réseau est utilisée. Elle consiste à générer statistiquement un grand nombre de réseaux de la dimension d'un pixel du MNT avec des paramètres prédéfinis (un diamètre de site, un taux de remplissage ou encore une distribution en tailles de sites dans le cas d'un réseau polydisperse), puis à les stocker dans un fichier où le code de calcul va venir « piocher » de manière aléatoire en cours de simulation. De plus, afin d'éviter la superposition des sites lors de la juxtaposition des réseaux pré-générés, des contraintes géométriques latérales sont imposées qui les rend tous imbriquables.

6.2.2 Gestion des données d'entrée du modèle

Tout d'abord, l'IUSTI a fourni à NOVELTIS la classification des végétaux regroupant les types de végétaux dont les propriétés d'inflammabilité et de combustibilité sont semblables. Il en est ressorti 8 classes distinctes. NOVELTIS a ensuite procédé au tri des espèces recensées par l'organisme étatique CRIGE (Centre Régional de l'Information Géographique) lors de la constitution de leurs cartes de végétation OCSOLGE sur la région PACA, ainsi que celles de

l'Agence Européenne de l'Environnement, qui constitue la base de données Corine Land Cover (CLC).

Tableau 16 : Classification des différentes typologies végétales selon leurs propriétés d'inflammabilité, telle qu'utilisée dans TechForFire, et correspondance avec les classifications utilisées dans les bases de données OCSOL et Corine Land Cover.

TechForFire	OCSOL-PACA-2006	CLC-2006
1- Forêts de feuillus	311- Forêts de feuillus	311- Forêts de feuillus
2- Forêts de conifères	312- Forêts de conifères	312- Forêts de conifères
3- Forêts indifférenciées	324- Forêts et végétation arbustive en mutation	324- Forêts et végétation arbustive en mutation
	313- Forêts mélangées	313- Forêts mélangées
4- Végétation arbustive et/ou herbacée	231- Prairies	231- Prairies
	321- Pelouse et pâturages naturels	321- Pelouse et pâturages naturels
	333- Végétation clairsemée	333- Végétation clairsemée
5- Landes	322- Landes subalpines	322- Landes subalpines
6- Maquis	323- Maquis et garrigues	323- Maquis et garrigues
7- Terres agricoles	221- Vignobles	221- Vignobles
	222- Vergers et petits fruits	222- Vergers et petits fruits
	223- Oliveraies	223- Oliveraies
	211- Serres	211- Terres arables non irriguées
	214- Zones à fortes densité de serres	214- Zones à fortes densité de serres
	213- Rizières	213- Rizières
	212- Terres arables autres que serres, zones à forte densité de serres et rizières	212- Terres arables irriguées en permanence
	224- Lavandins	
	241- Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	241- Cultures annuelles associées aux cultures permanentes
	242- Systèmes culturaux	242- Systèmes culturaux
	243- Territoires principalement occupés par l'agriculture avec présence de végétation	243- Territoires principalement occupés par l'agriculture avec présence de végétation
	244- Territoires agro-forestiers	244- Territoires agro-forestiers
	8- Autres	111- Tissu urbain continu
112- Tissu urbain discontinu		112- Tissu urbain discontinu
113- Bâti diffus		
121- Zones industrielles ou commerciales		121- Zones industrielles ou commerciales
122- Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés		122- Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés
123- Zones portuaires		123- Zones portuaires
124- Aéroports		124- Aéroports

L'objectif était ici de définir une base de travail, pour ensuite générer des cartes de végétation à partir d'images satellitaires, actualisées avant la saison estivale. Les cartes OCSOLGE et CLC de 2006 ont ainsi servi à la calibration et la validation d'un traitement d'image pour obtenir des cartes de végétation, selon la classification TechForFire, directement utilisable par le modèle incendie développé par l'IUSTI, avec une résolution de 30 mètres.

Les données de vent proviennent d'un modèle développé en interne par NOVELTIS. Basé à grande échelle sur un modèle de type WRF, à une résolution de 2 km, une descente en échelle est effectuée par le modèle de couche limite CALMET, compte tenu de la rugosité du sol. Il tourne en continu sur la région PACA et est capable de fournir une prévision fiable à 36 heures. Les données nécessaires au modèle en sont extraites, à savoir l'intensité et la direction du vent, l'humidité relative et la température de l'air, le tout à une résolution de 60 mètres (en général, on considère qu'un calcul de vent est fiable avec une résolution double de celle du MNT utilisé). La cartographie du vent qu'utilise le modèle de propagation est actualisée toutes les heures, en cours de calcul.

Le modèle numérique de terrain provient d'une base de données ASTER, qui délivre des données de relief sur l'ensemble du globe avec une résolution de 30 mètres.

6.2.3 Développements complémentaires

L'intérêt d'un outil opérationnel étant son actualisation en temps réel, il a été nécessaire d'intégrer la prise en compte des actions de lutte. Le modèle et l'interface WEB et Mobile ont ainsi été adaptés afin qu'un agent de lutte opérationnel puisse mettre en pause le calcul et dessiner directement sur l'image satellite de la zone une opération de largage ou une barrière combustible. Le calcul prend ainsi directement cette modification en compte (actualisation en cours de calcul), et les zones concernées sont inertées. L'opérateur dispose ainsi d'un outil d'évaluation de l'impact des actions de lutte.

6.3 Essai sur le feu de Velaux

Un incendie s'est déclaré le 28 juillet 2015, à proximité de la commune de Velaux. Il a brûlé près de 30 ha en l'espace d'une heure et demie. L'outil TechForFire a été appliqué, en aveugle à la demande du SDIS 13, sans la partie acquisition aérienne mais avec un point d'éclosion géo-localisé comme seule donnée. Le vent a été recalculé en utilisant les conditions météorologiques au moment de l'éclosion.

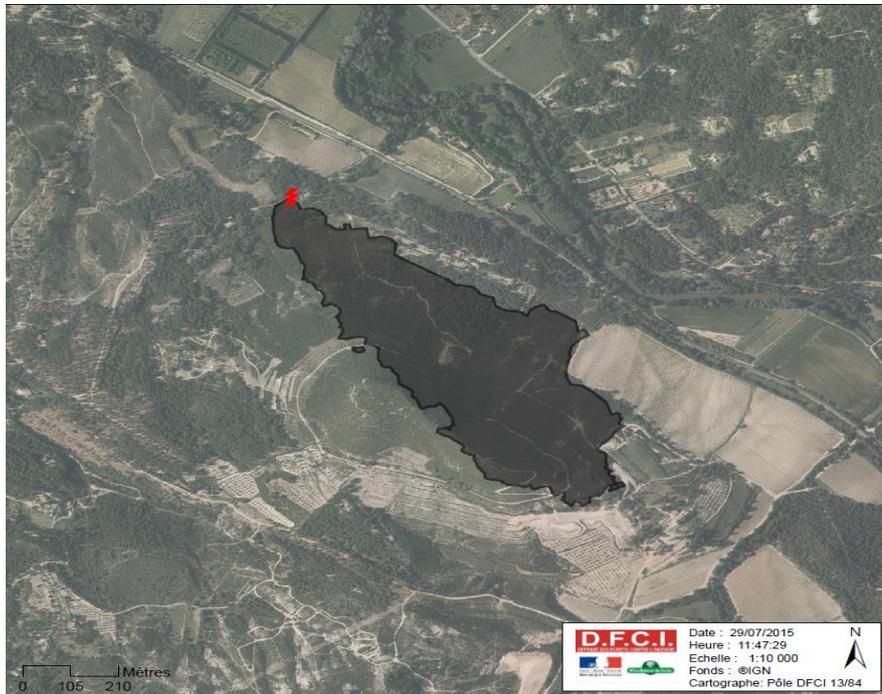
Tableau 17 : Paramètres utilisés pour la simulation du feu de Velaux (2015). Les paramètres en gras proviennent de mesures en laboratoire.

Résolution du MNT (m)	50	$m^{DFE''}$ (kg/m ²)	2.682
U (m/s) (à 10 m du sol)	Local	$m^{eau''}$ (kg/m ²)	1.582
T_{∞} (K)	313	ρ^{DFE} (kg/m ²)	720
RH (%)	42	σ (1/m)	5145
Δt (s)	1	ϵ	0.9
Taux de couverture végétale	0.91	τ (s)	30
D (m)	3	Δh (MJ/kg)	15.360
H (m)	3	χ^r	0.3

L'incendie a donc été rejoué. Les résultats de la simulation sont présentés sur la Figure 52 et comparés aux relevés de la DFCI (Défense de la Forêt Contre les Incendies).

On obtient un excellent accord entre les contours réels et les contours simulés, avec une légère surestimation de la surface brûlée cependant, qui peut s'expliquer par une action de lutte sur le flanc droit, non prise en compte par le modèle. Les zones claires sur l'image satellite correspondent à des plantations de vignes, très peu propices à la propagation du feu. Le feu s'est propagé sur un couvert de végétation de types feuillus et conifères. La simulation de cet incendie a pris moins de 30 secondes.

(a)



(b)

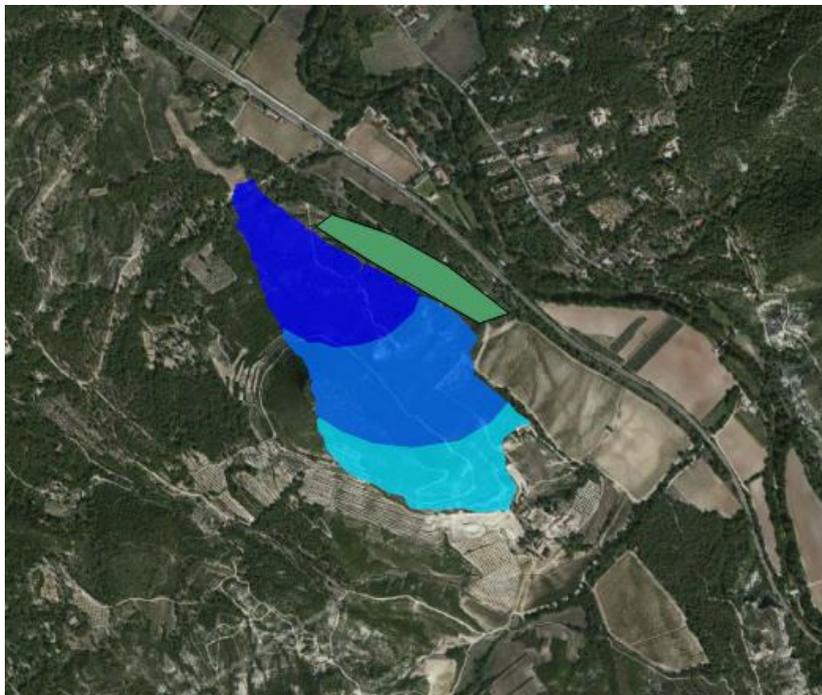


Figure 52 : Contour relevé après le feu (a) et contours simulés toutes les 30 minutes par l'outil TechForFire (b). Une nuance de couleur bleue correspond à 30 minutes de propagation. Le polygone vert correspond à une zone d'attaque supposée des personnels de lutte.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail de thèse a été d'élargir le domaine d'application du modèle de propagation et lui conférer un caractère opérationnel, afin de l'intégrer dans l'outil opérationnel d'aide à la lutte tactique contre les incendies de forêt développé par la société NOVELTIS, dans le cadre du projet TechForFire.

Afin d'y parvenir, le modèle physique a d'abord été revu. Tout d'abord, le bilan thermique prend désormais en compte une capacité calorifique qui varie en fonction de la température, ce qui implique que la résolution, désormais non directe, se fait à présent par le biais de la méthode itérative de Newton-Raphson. Le modèle prend désormais également en compte la contribution de la convection à l'intérieur de la strate végétale.

Le calcul du rayonnement entre les flammes et les sites végétaux environnants est originellement fait par la méthode de Monte Carlo couplée à un modèle de flamme solide. Bien que très précise et facile à mettre en place, cette méthode très coûteuse en temps de calcul n'est pas compatible avec un modèle « temps-réel ». Le premier développement effectué afin de réduire le temps de calcul a donc été de remplacer la méthode de Monte Carlo par l'utilisation d'une base de données d'abaques de rayonnement au cours de la simulation de la propagation. Ces abaques sont issus d'un précalcul, toujours par la méthode de Monte Carlo et avec un fort raffinement, qui détermine pour un grand nombre de configurations géométriques et de conditions météorologiques le facteur de vue entre une flamme et l'ensemble des surfaces élémentaires du sol plan. Les iso-facteurs de vue qui en résultent ont une forme soit circulaire (flamme droite), soit elliptique (flamme ou sol incliné). Un algorithme génétique est alors employé afin de déterminer les paramètres de l'ellipse propres à chacun des iso-facteurs de vue. Les résultats sont globalement satisfaisants en termes de précision en comparaison des calculs effectués avec la méthode de Monte Carlo à chaque étape de temps, tout en divisant par 144 le temps de calcul global. L'amélioration de la précision du calcul utilisant la base de données radiative fait partie des perspectives de ce travail. Une piste à explorer, en première approximation, serait de réaliser une étude paramétrique afin d'optimiser le nombre et la distribution des iso-facteurs de vue utilisés, et apporter une correction pour tenir compte de la contribution du rayonnement reçu par la face latérale du site récepteur.

La taille des domaines impliqués dans les grands feux de forêt, pour lesquels l'outil TechForFire est conçu, introduit une autre problématique pénalisante pour le temps de calcul : la gestion mémoire d'une grande quantité de données. Afin d'y remédier, une méthode de suivi

d'interface a été développée. Il s'agit de considérer le réseau comme un assemblage de pixels, numérotés (i, j) et délimités par les mailles du modèle numérique de terrain, sur lesquels les sites combustibles, également numérotés par l'indice k , sont générés ou désalloués. Ce système de triple indexage (i, j, k) permet de manipuler, au cours du calcul, une liste dynamique des sites combustibles proches du front de flamme sans pour autant pénaliser les ressources informatiques en raison de la taille du domaine sur lequel le feu est susceptible de se propager. Les gains obtenus sont liés à la taille du domaine d'étude. On a ainsi montré que sur un domaine de 2 km par 2 km le temps de calcul est réduit de 40%.

Le modèle ainsi optimisé, en plus de développements d'ordre informatique sur l'algorithme du code et sa parallélisation, non détaillés dans ce manuscrit, a été appliqué sur différents cas d'études. Il s'agit d'un brûlage dirigé, instrumenté et mesuré, spécifiquement réalisé en Thaïlande en 2013, d'un feu historique qui a eu lieu en Corse près de Favone en 2009, et enfin une partie du East Peak Fire, 2013, un feu historique de grande ampleur du Colorado.

Les deux premiers incendies ont permis de montrer que le modèle physique est apte à simuler des feux qui présentent des modes de propagation prépondérants (rayonnement des braises pour les feux thaïlandais en raison des vent faibles et des petites flammes, convection et rayonnement de la flamme pour le feu corse), des végétaux, des vitesses de propagation et des hauteurs de flammes très différents. Le feu américain a finalement permis de démontrer la capacité du modèle à fournir des prévisions en temps réel, puisque le temps de calcul est 50 fois inférieur au temps de propagation réel, tout en fournissant des simulations proches des contours réels.

Un autre cas de simulation a été réalisé au cours de la validation de la chaîne complète du projet TechForFire, sur le feu de Velaux qui a eu lieu au cours de l'été 2015, avec des résultats très satisfaisants. Le projet TechForFire a été complété d'un point de vue technique et est opérationnel. Les développements et les couplages effectués dans ce cadre, entre le modèle et les autres modules de la chaîne opérationnelle, ont également été présentés (carte d'occupation des sols, cartographie du vent, actions de lutte).

Le modèle a par ailleurs été développé afin d'être appliqué à une étude de risque. Un exemple à but démonstratif a été présenté. Il s'agit du cas d'une maison située dans une forêt et positionnée au centre d'une zone circulaire déboisée de 30 m de rayon. La température des parois de la maison est calculée à chaque instant par un module conduction unidimensionnel,

afin de déterminer si la température d'inflammation est atteinte, en tenant compte des propriétés thermophysiques du matériau de construction utilisé.

A court terme, une étude de sensibilité sur le modèle ainsi développé va être menée, afin de situer les efforts de développements futurs, notamment en ce qui concerne la caractérisation des végétaux et le calcul des contributions radiative et convective. D'autre part, le modèle de rayonnement utilisant la méthode de Monte Carlo peut être amélioré par l'utilisation d'un modèle de flamme solide volumique (Collin et Lamorlette, 2012 ; Marchand, 2016). Cet ajout serait particulièrement pertinent dans le cas de flammes épaisses, sur des végétaux constituant des foyers de grand diamètre.

Dans certaines régions, les feux de forêt se propagent sur des végétations de typologies et de répartitions verticales très différentes. L'enjeu en termes de simulation de propagation se trouve dans la capacité du modèle à déterminer si et à quel moment il y a transition feu de surface / feu de cime, ou inversement (par l'émission de brandons par exemple). C'est donc une perspective intéressante pour le modèle actuel.

Les équations de transferts thermiques internes à la végétation et utilisées dans le modèle sont tirés d'études qui considèrent une végétation continue. Même si elles restent applicables lorsque les végétaux sont relativement proches, des améliorations peuvent être apportées dans le cas où les arbres sont très distants les uns des autres.

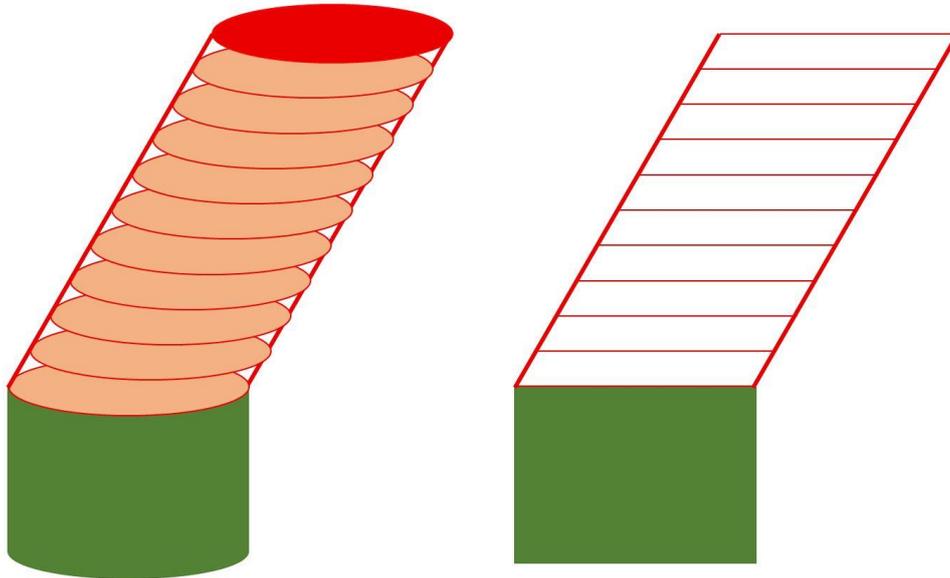
Enfin, les temps de calcul réduits du modèle permettent d'envisager son application à la cartographie du risque, en s'inspirant des travaux menés au SPE en Corse, qui utilise le modèle FOREFIRE basé sur les travaux de Balbi et développé par Filippi. Cette méthodologie consiste à générer un grand nombre de points d'éclosion de manière aléatoire sur un grand territoire (la région PACA par exemple), puis de classer la vulnérabilité de chaque pixel MNT en fonction du nombre de fois où ils sont touchés par un incendie.

ANNEXE : INTERSECTION DE QUANTUM PAR LA FLAMME OU PAR LA STRATE

On présente ici les méthodes employées pour déterminer si un quantum d'émission atteint ou non la strate végétale ou une flamme.

Intersection par la flamme

La flamme est discrétisée et représentée par un empilement de disques, alignés s'il n'y a pas de vent, ou décalés si la flamme est inclinée, mais tous parallèles à la surface supérieure de la strate.



L'intersection entre un quantum et une flamme est effective lorsque la trajectoire du quantum coupe un des disques qui forment la flamme. Soit un point d'émission $P(x_p, y_p, z_p)$, un vecteur d'émission $\vec{U}(u_1, u_2, u_3)$, C_i le centre du disque i , et $\vec{n}_S(n_1, n_2, n_3)$ la normale à la strate. On cherche un point I qui fasse partie du plan perpendiculaire à \vec{n}_S . Soit $\vec{C_i I_i}$ un vecteur qui appartient à ce plan, avec I_i le point d'intersection entre la droite d'émission et le disque i de la flamme, de coordonnées :

$$I_i = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p + t_i u_1 \\ y_p + t_i u_2 \\ z_p + t_i u_3 \end{bmatrix}$$

avec t_i le paramètre pour lequel I_i appartient au disque i .

Le fait que $\overrightarrow{C_i I_i}$ soit perpendiculaire à $\overrightarrow{n_s}$ nous mène à :

$$\begin{bmatrix} x_P + t_i u_1 - x_{C_i} \\ y_P + t_i u_2 - y_{C_i} \\ z_P + t_i u_3 - z_{C_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = 0$$

ou encore :

$$[(x_P - x_{C_i}) + t_i u_1]n_1 + [(y_P - y_{C_i}) + t_i u_2]n_2 + [(z_P - z_{C_i}) + t_i u_3]n_3 = 0$$

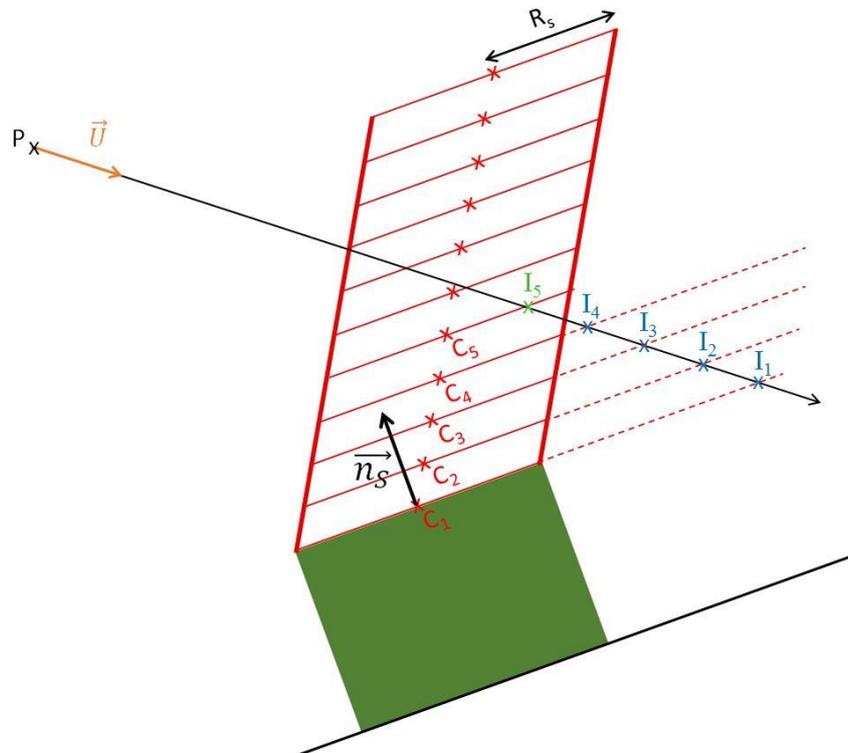
Ce qui nous donne l'expression du paramètre t_i suivante :

$$t_i = \frac{(x_{C_i} - x_P)n_1 + (y_{C_i} - y_P)n_2 + (z_{C_i} - z_P)n_3}{u_1 n_1 + u_2 n_2 + u_3 n_3}$$

L'appartenance du point I_i au disque i est soumise à la condition :

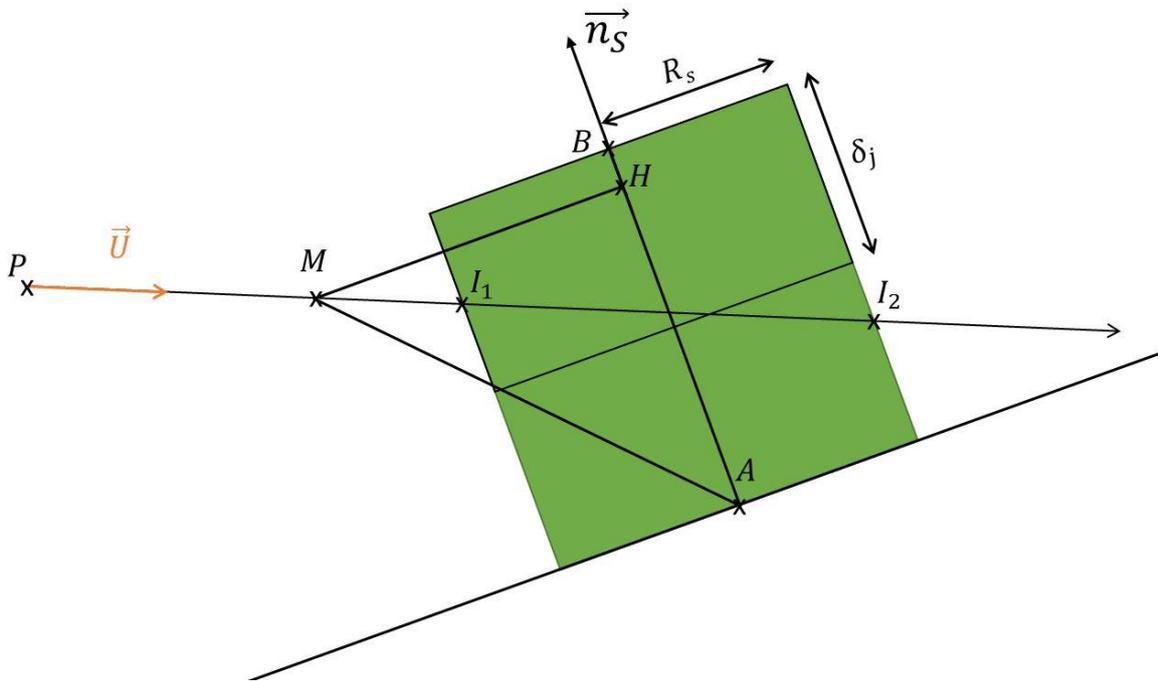
$$\|\overrightarrow{C_i I_i}\| = \sqrt{(x - x_{C_i})^2 + (y - y_{C_i})^2 + (z - z_{C_i})^2} \leq R_s$$

avec R_s le rayon du site et de la flamme.



Intersection de la strate

Soit le point d'émission $P(x_p, y_p, z_p)$ et le vecteur d'émission $\vec{U}(u_1, u_2, u_3)$. Comme schématisé ci-dessous, la recherche des impacts d'un quantum sur la strate consiste à déterminer l'existence d'un ou des points M tels que $HM = R_s$. Le point $A(x_0, y_0, z_0)$ est situé au centre et à la base du site, le point $B(x_1, y_1, z_1)$ au centre et au sommet du site combustible. Le point H est la projection du point M sur \overline{AB} . On définit $\vec{n}_s(n_1, n_2, n_3)$ la normale orthonormée au site végétal. Soit (x, y, z) les coordonnées du point M recherché.



On cherche d'abord à déterminer \overline{HM} . On a $\overline{HM} = \overline{AM} - \overline{AH}$. Or :

$$\overline{AH} = (\overline{AM} \cdot \vec{n}_s) \wedge \vec{n}_s = [n_1(x - x_0) + n_2(y - y_0) + n_3(z - z_0)] \wedge \vec{n}_s$$

d'où :

$$\overline{AH} = \begin{bmatrix} n_1^2(x - x_0) + n_1n_2(y - y_0) + n_1n_3(z - z_0) \\ n_1n_2(x - x_0) + n_2^2(y - y_0) + n_2n_3(z - z_0) \\ n_1n_3(x - x_0) + n_2n_3(y - y_0) + n_3^2(z - z_0) \end{bmatrix}$$

Ainsi :

$$\begin{aligned}\overline{HM} &= \begin{bmatrix} (x - x_0) - n_1^2(x - x_0) - n_1n_2(y - y_0) - n_1n_3(z - z_0) \\ (y - y_0) - n_1n_2(x - x_0) - n_2^2(y - y_0) - n_2n_3(z - z_0) \\ (z - z_0) - n_1n_3(x - x_0) - n_2n_3(y - y_0) - n_3^2(z - z_0) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (1 - n_1^2)(x - x_0) - n_1n_2(y - y_0) - n_1n_3(z - z_0) \\ -n_1n_2(x - x_0) + (1 - n_2^2)(y - y_0) - n_2n_3(z - z_0) \\ n_1n_3(x - x_0) - n_2n_3(y - y_0) + (1 - n_3^2)(z - z_0) \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Pour que M appartienne au cylindre, il faut satisfaire la condition $\|\overline{HM}\| = R_S$. Ce qui revient à résoudre l'équation :

$$\begin{aligned}& \left[\overbrace{(1 - n_1^2)}^{A_1} (x - x_0) - \overbrace{n_1n_2}^{B_1} (y - y_0) - \overbrace{n_1n_3}^{C_1} (z - z_0) \right]^2 \\ & + \left[-\overbrace{n_1n_2}^{A_2} (x - x_0) + \overbrace{(1 - n_2^2)}^{B_2} (y - y_0) - \overbrace{n_2n_3}^{C_2} (z - z_0) \right]^2 \\ & + \left[\overbrace{n_1n_3}^{A_3} (x - x_0) - \overbrace{n_2n_3}^{B_3} (y - y_0) + \overbrace{(1 - n_3^2)}^{C_3} (z - z_0) \right]^2 = R_S^2\end{aligned}$$

Les coordonnées du point M parcourant la droite d'émission s'écrivent :

$$M = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p + tu_1 \\ y_p + tu_2 \\ z_p + tu_3 \end{bmatrix}$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\begin{aligned}& [A_1(x_p - x_0 + tu_1) + B_1(y_p - y_0 + tu_2) + C_1(z_p - z_0 + tu_3)]^2 \\ & + [A_2(x_p - x_0 + tu_1) + B_2(y_p - y_0 + tu_2) + C_2(z_p - z_0 + tu_3)]^2 \\ & + [A_3(x_p - x_0 + tu_1) + B_3(y_p - y_0 + tu_2) + C_3(z_p - z_0 + tu_3)]^2 = R_S^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\overbrace{A_1(x_P - x_0) + B_1(y_P - y_0) + C_1(z_P - z_0)}^{\alpha_1} + t \overbrace{(A_1u_1 + B_1u_2 + B_1u_3)}^{\beta_1} \right]^2 \\
& + \left[\overbrace{A_2(x_P - x_0) + B_2(y_P - y_0) + C_2(z_P - z_0)}^{\alpha_2} + t \overbrace{(A_2u_1 + B_2u_2 + B_2u_3)}^{\beta_2} \right]^2 \\
& + \left[\overbrace{A_3(x_P - x_0) + B_3(y_P - y_0) + C_3(z_P - z_0)}^{\alpha_3} + t \overbrace{(A_3u_1 + B_3u_2 + B_3u_3)}^{\beta_3} \right]^2 \\
& = R_S^2
\end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \alpha_1^2 + \beta_1^2 t^2 + 2t\alpha_1\beta_1 + \alpha_2^2 + \beta_2^2 t^2 + 2t\alpha_2\beta_2 + \alpha_3^2 + \beta_3^2 t^2 + 2t\alpha_3\beta_3 = R_S^2$$

D'où l'équation du second degré :

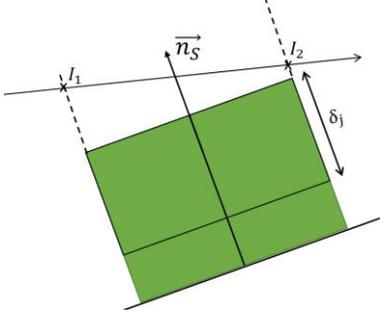
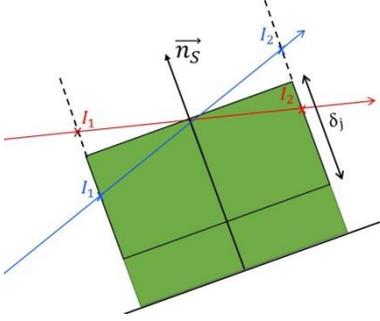
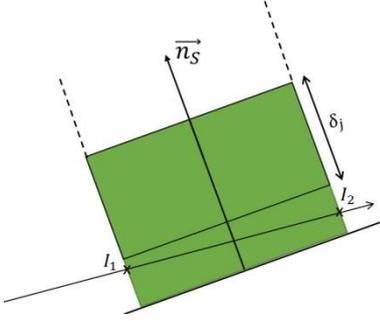
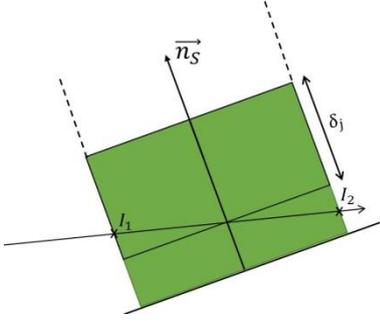
$$\overbrace{(\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2)}^a t^2 + \overbrace{2(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2 + \alpha_3\beta_3)}^b t + \overbrace{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - R_S^2)}^c = 0$$

Si le discriminant $\Delta = b^2 - 4ac$ est positif ou nul, alors il existe deux (ou une double) solutions :

$$t_{I_1} = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a} ; t_{I_2} = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a}$$

qui définissent les valeurs de t qui correspondent aux positions des points d'intersection I_1 et I_2 de la droite avec le cylindre infini. Pour que le quantum soit comptabilisé, il faut que sa trajectoire coupe le volume de contrôle situé dans la partie supérieure de la strate et conditionné par δ_j , l'épaisseur de pénétration du rayonnement du site j .

Pour cela, on calcule les produit scalaires $\overrightarrow{BH_{I_1}} \cdot \vec{n}_S$ et $\overrightarrow{BH_{I_2}} \cdot \vec{n}_S$. Plusieurs configurations sont alors possibles.

$\begin{cases} \overrightarrow{BH_{I_1}} \cdot \vec{n}_S > 0 \\ \overrightarrow{BH_{I_2}} \cdot \vec{n}_S > 0 \end{cases}$		Impact = 'non'
$\begin{cases} \overrightarrow{BH_{I_1}} \cdot \vec{n}_S > 0 \\ \overrightarrow{BH_{I_2}} \cdot \vec{n}_S < 0 \end{cases}$ <p>ou</p> $\begin{cases} \overrightarrow{BH_{I_1}} \cdot \vec{n}_S < 0 \\ \overrightarrow{BH_{I_2}} \cdot \vec{n}_S > 0 \end{cases}$		Impact = 'oui'
$\begin{cases} \overrightarrow{BH_{I_1}} \cdot \vec{n}_S < 0 \\ \overrightarrow{BH_{I_2}} \cdot \vec{n}_S < 0 \end{cases}$ <p>et</p> $\ \overrightarrow{BH_{I_1}} \cdot \vec{n}_S\ > \delta_j$ <p>et $\ \overrightarrow{BH_{I_2}} \cdot \vec{n}_S\ > \delta_j$</p>		Impact = 'non'
<p>Si</p> $\begin{cases} \overrightarrow{BH_{I_1}} \cdot \vec{n}_S < 0 \\ \overrightarrow{BH_{I_2}} \cdot \vec{n}_S < 0 \end{cases}$ <p>et</p> $\ \overrightarrow{BH_{I_1}} \cdot \vec{n}_S\ < \delta_j$ <p>et/ou $\ \overrightarrow{BH_{I_2}} \cdot \vec{n}_S\ < \delta_j$</p>		Impact = 'oui'

REFERENCES
Liens internet :

- (1) http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GlobalFire/fire_3.php
- (2) http://www.fire.ca.gov/fire_prevention/downloads/2007CaliforniaBuildingCode.pdf
- (3) <https://www.youtube.com/watch?v=mZnWDSgoxWE>
- (4) <https://blog.csiro.au/straw-house-1-fire-0/>
- (5) <http://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite/Securite-civile/La-prevention/Les-projets-de-Plans-de-Prevention-des-Risques-d-Incendies-de-Forets-PPRIIF>

Publications :

- Adou J. K., Billaud Y., Brou D.A., Clerc J. P., Consalvi J. L., Fuentes A., Kaiss A., Nmira F., Porterie B., Zekri L., Zekri N. (2010). Simulating wildfire patterns using a small-world network model. *Ecol. Model.* 221, 1463–71.
- Ahn S. J., Rauh W., Warnecke H. J. (2001). Least-squares orthogonal distances fitting of circle, sphere, ellipse, hyperbola, and parabola, *Pattern Recognition*, 34:2283–2303.
- Albinet G., Searby G., Stauffer D. (1986). Fire propagation in a 2-d random medium, *Le Journal de Physique*, 47:1–7.
- Albini F. A. (1976). Estimating wildfire behavior and effects, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-GTR-30 (Ogden, UT).
- Albini F. A. (1979). Spot fire distance from burning trees: a predictive model. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Technical Report INT-56. (Ogden, UT)
- Albini F. A. (1981). A model for the wind-blown flame from a line fire, *Combustion and Flame*, 43: 155-174.
- Albini F. A., Reinhardt E. D. (1995). Modeling ignition and burning rate of large woody natural fuels, *International Journal of Wildland Fire*, 5(2), 81-91.
- Anderson H. E. (1970). Forest fuel ignitability, *Fire Technology* 6:312–319.
- Anderson D., Catchpole E., de Mestre N., Parkes T. (1982). Modelling the spread of grass fires, *Journal of Australian Mathematics Society, Series B*, 23:451–466.
- Andrews P. (1986). Behave: fire behaviour prediction and fuel modellings system – burn subsystem, part 1. Technical Report General Technical Report INT-194, 130 pp., USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Balbi J. H., Rossi J. L., Marcelli T., Santoni P. A. (2007). “A 3D physical real-time model of surface fires across fuel beds,” *Combustion Science and Technology*, vol. 179, no. 12, pp. 2511– 2537.
- Balbi J. H., Morandini F., Silvani X., Filippi J. B., Rinieri F. (2009). “A physical model for wildland fires,” *Combustion and Flame*, vol. 156, no. 12, pp. 2217–2230.
- Balbi J. H., Rossi J. L., Marcelli T., Chatelon F. J. (2010). Physical modeling of surface fire under nonparallel wind and slope conditions, *Combustion Science and Technology*, 182(7), 922-939.
- Ball G. L., Guertin D. P. (1992). Improved Fire Growth Modeling, *International Journal of Wildland Fire* 2 , 47–54.

- Bard S., Pagni P. J. (1985). Spatial Variation of Soot Volume Fractions in Pool Fire Diffusion Flames, *Fire Safety Science -- Proceedings of the First International Symposium, International Association for Fire Safety Science*: 361-369, London, UK.
- Barros F. J., Mendes M. (1997). Forest fire modelling and simulation in the DELTA environment, *Simulation Practice and Theory*, Volume 5, Issue 3, Pages 185-197
- Beer T., Enting I. (1990). Fire spread and percolation modelling, *Mathematical and Computer Modelling*. 13; 77-96.
- Berjak S. G., Hearne J. W. (2002). An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system, *Ecological Modelling*, Volume 148, Issue 2, 15 February 2002, Pages 133-151.
- Bezdek J. C., Keller J., Krisnapuram R., Pal N. R. (2005). Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing, *Springer*, New York.
- Billaud Y., Kaiss A., Consalvi J. L., Porterie B. (2011). Monte Carlo estimation of thermal radiation from wildland fires, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 50, Issue 1, January 2011, Pages 2-11, ISSN 1290-0729.
- Billaud Y. (2011). Modélisation hybride stochastique-déterministe des incendies de forêts. Thèse de Doctorat de l'Université de Provence.
- Billaud Y., Zekri N., Kaiss A., Drissi M., Pizzo Y., Acem Z., Collin A., Santoni P. A., Bosseur, F., Boulet, P., Porterie, B. (2012). A hybrid small-world network/semi-physical model for predicting wildfire spread in heterogeneous landscapes. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 395, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- Bisgambiglia P. A., Rossi J.-L., Franceschini R., Chatelon F.-J., Rossi L., Marcelli T. (2017). DIMZAL: A Software Tool to Compute Acceptable Safety Distance. *Open Journal of Forestry*, 7, 11-33.
- Blanchi R., Lucas C., Leonard J., Finkele K. (2010). Meteorological conditions and wildfire-related house loss in Australia, *Int. J. Wildland Fire*, 19, pp. 914–926.
- Box G. E. P., Muller M. E. (1958). A Note on the Generation of Random Normal Deviates. *Ann. Math. Statist.* 29, no. 2, 610--611.
- Butler B. W. (1993). Experimental measurements of radiant heat fluxes from simulated wildfire flames. In/ *proceedings of the 12th Conf. of Fire and Forest Meteorology*, 104-111.
- Caldarelli G., Frondoni R., Gabrielli A., Montuori M., Retzlaff R., Ricotta C. (2001). Percolation in real wildfires. *Europhysics Letters*, 56(4):510–516.
- Calkin D. E., Cohen J. D., Finney M. A., Thompson M. P. (2014). How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(2), 746-751.
- Cheney N. P., Gould J. S., Catchpole W. R. (1993). The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire spread in grasslands, *Int. J. Wildland Fire* 3(1), 31-44.
- Cheney N. P., Gould J. S., Catchpole W. R. (1998). Prediction of fire spread in grasslands. *Int. J. Wildland Fire* 9 (1), 1-13.
- Chuvieco E. (2009). Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems. *Springer*.
- Cohen J. D. (1999). Reducing the wildland fire threat to homes: where and how much ?, In *Proceedings of the symposium on fire economics, planning, and policy: bottom lines* (pp. 189-195).
- Cohen J. D. (2000). Preventing disaster: Home ignitability in the wildland-urban interface. *Journal of Forestry* 98(3): 15-21.
- Cohen J. D. (2004). Relating flame radiation to home ignition using modeling and experimental crown fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(8), 1616-1626.
- Cohen J. (2010). The wildland-urban interface fire problem. *Fremontia*. 38(2)-38(3): 16-22.

-
- Cohen J. D., Finney M.A. (2014). Fine fuel particle heating during experimental laboratory fires, *Advances in Forest Fire Research*, Viegas D.X. (ed.), Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Collin A., Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine – Nancy 1, 2006
- Collin A., Lamorlette A., Acem Z. (2012). Analyse théorique d'un modèle de flamme pour l'étude des feux de forêts : de l'identification de paramètres au développement d'outils métrologiques, *Congrès de la Société Française de Thermique*, Bordeaux, 29 mai au 01 juin 2012.
- CWFGM Steering Committee (2004). Prometheus User Manual v.3.0.1. Canadian Forest Service.
- Daniell J., Wenzel F., Schaefer A. (2016). The economic costs of natural disasters globally from 1900-2015: historical and normalised floods, storms, earthquakes, volcanoes, bushfires, drought and other disasters. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 18, p. 1899).
- De Gennes, P.G. (1976). *La Recherche* 7, 919–927.
- De Mestre N. J., Catchpole E. A., Anderson D. H., Rothermel R. C. (1989). Uniform propagation of a planar fire front without wind. *Combust. Sci. Technol.* 65, 231-244.
- Drissi M., Billaud Y., Kaiss A., Porterie B. (2013). Modelling the spreading of large-scale wildland fires, *21ème Congrès Français de Mécanique*, 26 au 30 août 2013, Bordeaux, France(FR).
- Evans D. D., Rehm R. G., McPherson E. G. (2003). Physics-based modelling of wildland-urban intermix fires. In *Proceedings of Third International Wildland Fire Conference*. Sydney, Australia.
- Evans D. D., Rehm R. G., Baker E. S. (2004). Physics-based Modeling for WUI Fire Spread: Simplified Model Algorithm for Ignition of Structures by Burning Vegetation (p. 36). US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- Evans D. D., Rehm R. G., Baker E. S., McPherson E. G., Wallace J. B. (2004). Physics-based modeling of community fires. In *Proceedings of the 10th International Interflam Conference* (Vol. 2, pp. 1065-1076).
- FAO (2007) Fire Management—Global Assessment 2006. A Thematic Study Prepared in the Framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. *FAO Forestry Paper* 151, Rome.
- Filippi J. B., Bosseur F., Pialat X., Santoni P.-A., Strada S., Mari C. (2011). Simulation of fire/atmosphere interaction with the MesoNH-ForeFire models, *J. of Combustion*.
- Finney M. A. (1994). Modeling the spread and behaviour of prescribed natural fires. In *Proceedings of the 12th Conference on Fire and Forest Meteorology*, October 26-28 1993, Jekyll Island, Georgia, pages 138–143.
- Finney M. A. (1998). FARSITE: Fire area simulator—model development and evaluation. Technical Report Research Paper RMRS-RP-4, USDA Forest Service.
- Finney M. A., Cohen J. D. (2003). Expectation and evaluation of fuel management objectives. In *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-29* (pp. 353-366).
- Finney M. A. (2004). *FARSITE: Fire area simulator: model development and evaluation*. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

- Finney M. A. (2006). An overview of FlamMap modeling capabilities. In: Andrews, P.L.; Butler B.W. (comps.). Fuels Management – How to Measure Success: Conference Proceedings. 28-30 March 2006, Portland, Oregon. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado. Proceedings RMRS-P-41. pp 213-219
- Forestry Canada Fire Danger Group (1992). Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Inf. Rep. ST-X-3, Forestry Canada, Ottawa, Ontario.
- Galiana-Martin L., Herrero G., Solana J. (2011). A wildland-urban interface typology for forest fire risk management in Mediterranean areas. *Landscape Research*, 36, 151-171.
- Ganteaume A., Jappiot M., Lampin C., Guijarro M., Hernando C. (2013a). Flammability of some ornamental species in wildland-urban interfaces in Southeastern France: laboratory assessment at particle level, *Environ. Manag.* 52 (2), 467-480.
- Ganteaume A., Jappiot M., Lampin C. (2013b). Assessing the flammability of surface fuels beneath ornamental vegetation in wildland-urban interfaces in provence (south-eastern France), *Int. J. Wildland Fire* 22, 333-342.
- Gould J. (2007). Overview of operational fire spread simulation modelling. Briefing paper to the Australasian Fire Authorities Council, Rural and Land Management Agency Sub-group.
- Green D. G., Tridgell A., Gill A. M. (1990). Interactive simulation of bushfires in heterogeneous fuels. *Mathematical and Computer Modelling*, 13(12), 57-66.
- Grishin A. M. (1996). Mathematical Modelling of Forest Fires and New Methods of Fighting Them, in : F. Albini (Ed.), Tomsk State University.
- Guijarro M., Valette, J. C. (2002). Characterisation of wildland fuel particles: methods. FIRE STAR: a decision support system for fuel management and fire hazard reduction in Mediterranean wildland-urban interface. CEC Commission of the European Communities Directorate General for Agriculture Bruxelles (BEL), INIA Madrid (ESP), INRA Avignon (FRA). Deliverable d6-01. 11p.
- Hammer R. B.; Stewart S. I.; Radeloff, V. C. (2009). Demographic trends, the wildland-urban interface, and wildfire management, *Society and Natural Resources*. 22: 777-782.
- Hargrove W. W., Gardner R. H., Turner M. G., Romme W. H., Despain D. G. (2000). Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecological Modelling*, 243–263.
- Haynes K., Handmer J., McAneney J., Tibbits A., Coates L. (2010). Australian Bush fire fatalities 1900-2008: Exploring trends in relation to the ‘Prepare, Stay and defend or leave early’ policy. *Environ. Sci. Policy* 13, 185–194.
- Heskestad G. (1983). Luminous heights of turbulent diffusion flames, *Fire Safety Journal* 5:103-108.
- Hottel H. C., Williams G. C., Steward F. R. (1965). The modeling of firespread through a fuel bed, *Symposium (International) on combustion* 10 : 997-1007.
- Hough W. A. (1969). Caloric value of some forest fuels of the southern United States. U.S. For. Sen. Southeast. For. Exp. Stn. Res. Notes SE-110
- Incropera F. P., De Witt D. P. (1985). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Wiley, New York.
- Incropera F. P., De Witt D. P. (1996). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, *John Wiley and Sons*, New York, p. 340.
- Johnston F. H., Henderson S. B., Chen Y., Randerson J. T., Marlier M., DeFries R. S., Kinney P., Bowman D. M., Brauer M. (2015). Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Justus C. G., Mikhail A. (1976). Height variation of wind speed and wind distributions statistics. *Geophysical Research Letters*, 3(5), 261-264.
- Kaiss A., Zekri L., Zekri N., Porterie B., Clerc J. P., Picard C. (2007). Efficacité des coupures de combustible dans la prévention des feux de forêts. *Comptes Rendus Physique*, 8(3), 462-468.

-
- Kalabokidis K. D., Hay C. M., Hussin Y. A. (1991) Spatially resolved fire growth simulation. In 'Proceedings of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology', 16–19 April 1991, Missoula, MT. (Eds PL Andrews, DF Potts) pp. 188–195. (Society of American Foresters: Bethesda, MD)
- Kanatani K., Rangarajan P. (2011) Hyper least squares fitting of circles and ellipses, *Computational Statistics and Data Analysis* 55(6):2197–2208.
- Karafyllidis I., Thanailakis A. (1997). A model for predicting forest fire spreading using cellular automata, *Ecological Modelling*, Volume 99, Issue 1, Pages 87-97, ISSN 0304-3800.
- Kioutsioukis I., de Meij A., Jakobs H., Katragkou E., Vinuesa J. F., Kazantzidis A. (2016). High resolution WRF ensemble forecasting for irrigation: Multi-variable evaluation, *Atmospheric Research*, Volume 167, 1 January 2016, Pages 156-174, ISSN 0169-8095.
- Knuth D. E. (1974). Structured Programming with go to Statements. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 6(4), 261-301.
- Koo E., Pagni P.J., Woycheese J., Stephens S., Weise D.R., Huff J. (2005). A simple physical model for fire spread rate. In: *proceedings of the 8th Int. Symp. on Fire Safety Science*, 851-862.
- Kourtz P., O'Reagan W. G. (1971). A model for a small forest fire to simulate burned and burning areas for use in a detection model. *For Sci*, 17(2), 163-169.
- Lampin-Maillet C., Jappiot M., Long M., Bouillon C., Morge D., Ferrier J. P. (2010). Mapping wildland-urban interfaces at large scales integrating housing density and vegetation aggregation for fire prevention in the South of France, *Journal of Environmental Management*, Volume 91, Issue 3, January–February 2010, Pages 732-741, ISSN 0301-4797.
- Levine J. S., Bobbe T., Ray N., Singh A., Witt R. G. (1999), Wildland fires and the environment: A global synthesis, Rep. UNEP/DEIAEW/TR. 99-1, United Nations Environ. Prog., New York.
- Li X., Magill W. (2000). Modelling fire spread under environmental influence using a cellular automaton approach, *Complexity International* 08, li01.
- Linn R. R. (1997). A transport model for prediction of wildfire behaviour. PhD Thesis LA-13334-T, Los Alamos National Laboratory. Reissue of PhD Thesis accepted by Department of Mechanical Engineering, New Mexico State University.
- Liu Y., Stanturf J., Goodrick S. (2010). Trends in global wildfire potential in a changing climate, *Forest Ecology and Management*, Volume 259, Issue 4, 5 February 2010, Pages 685-697, ISSN 0378-1127.
- Liu Z., Qiao H. (2009) Multiple ellipses detection in noisy environments: A hierarchical approach, *Pattern Recognition* 42(11):2421–2433.
- Lopes A. M. G., Cruz M. G., Viegas D. X. (1998). Firestation – an integrated system for the simulation of wind flow and fire spread over complex topography. In: Viegas, D.X. (ed.). Proceedings, *3rd International Conference on Forest Fire Research and 14th Fire and Forest Meteorology Conference*, 16-20 November 1998, Luso, Coimbra, Portugal. pp 741-754.
- Luke R. H., McArthur A. G. (1977). Bushfires in Australia, Australian Government Publishing Service, Canberra.
- Marchand A., Propagation des feux de végétation : expérimentations à l'échelle du laboratoire et validation d'un propagateur numérique, Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine, 2016.

- Markstein G. H. (1984). Relationship between smoke point and radiant emission from buoyant turbulent and laminar diffusion flames. *Proc Combust Inst* 1984;20:1055–61.
- Massada A. B., Radeloff V. C., Stewart S. I., Hawbaker T. J. (2009). Wildfire risk in the wildland–urban interface: A simulation study in northwestern Wisconsin, *Forest Ecology and Management*, Volume 258, Issue 9, 10 October 2009, Pages 1990-1999, ISSN 0378-1127.
- McCaffrey S., Toman E., Stidham M., Shindler B. (2012). Social science research related to wildfire management: an overview of recent findings and future research needs. *International Journal of Wildland Fire* 22, 15-24.
- Mell W., Charney J. J., Jenkins M. A., Cheney, P., Gould, J. (2005). “Numerical simulations of grassland fire behavior from the LANL - FIRETEC and NIST - WFDS models” -- *Proceedings of the EastFIRE Conference*, Fairfax, VA. 2005.
- Mell W., Jenkins M., Gould J., Cheney, P. (2006). A physics based approach to modeling grassland fires. *International Journal of Wildland Fire*, 15(4):in press.
- Mell W., Jenkins M. A., Gould J., Cheney P. (2007). A physics-based approach to modelling grassland fires, *International Journal Wildland Fire* 16:1-22.
- Mell W., Maranghides A., McDermott R., Manzello S. L. (2009). Numerical simulation and experiments of burning douglas-fir trees. *Combustion and Flame*.
- Mell W., Manzello S. L., Maranghides A., Butry D., Rehm R. G. (2010). The wildland–urban interface fire problem – current approaches and research needs. *International Journal of Wildland Fire* 19, 238-251.
- Moritz M. A., Batllori E., Bradstock R. A., Gill A. M., Handmer J., Hessburg P. F., ..., Syphard, A. D. (2014). Learning to coexist with wildfire. *Nature*, 515(7525), 58-66.
- Morvan D., Dupuy J. L. (2004). Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation, *Combustion and flame*, 138(3), 199-210.
- Morvan D., Méradji S., Accary G. (2009). Physical modelling of fire spread in grasslands. *Fire Safety Journal*, 44(1), 50-61.
- Nahmias J., Téphany H., Guyon E. (1989). Propagation de la combustion sur un réseau hétérogène bidimensionnel. *Revue de Physique Appliquée*, 24 (7), pp.773-777.
- Nelson Jr R. M. (2000). Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content, *Canadian Journal of Forest Research*, 30(7):1071–1087.
- Nmira F., Consalvi J. L., Boulet P., Porterie, B. (2010). Numerical study of wind effects on the characteristics of flames from non-propagating vegetation fires, *Fire Safety Journal* 45:129–141.
- Pagni P. J., Peterson T. P. (1973). Flame spread through porous fuels. In: *proceedings of the 14th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1099-1107.
- Pagni P. J., Okoh C. I. (1985). Soot generation within radiating diffusion flames. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 20, No. 1, pp. 1045-1054). Elsevier.
- Papadopoulos G. D., Pavlidou F. N. (2011). A comparative review on wildfire simulators, *IEEE systems Journal*, 5(2), 233-243.
- Parent G., Acem Z., Lechêne S., Boulet P. (2010). Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 49, Issue 3, March 2010, Pages 555-562, ISSN 1290-0729.
- Parker W.J. (1989). Prediction Of The Heat Release Rate Of Douglas Fir. *Fire Safety Science* 2: 337-346.
- Pastor E., Zarate L., Planas E., Arnaldos J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behavior, *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(2):139–153.

-
- Pearce H. G. (2008). Review of fire growth simulation models for application in New Zealand. Scion, Rural Fire Research Group, Christchurch. Scion Client Report No. 16246. 36 p. [Output No. 43510]
- Porterie B., Morvan D., Loraud J. C., Larini M. (2000). Firespread through fuel beds: modeling of windaided fires and induced hydrodynamics, *Physics Fluids* 12(7), 1762-1782.
- Porterie B., Zekri N., Clerc J. P., Loraud J. C. (2005a). Un Réseau de Petit Monde local à sites pondérés pour les feux de forêts, *Comptes Rendus Physique* 6, 151-157.
- Porterie B., Zekri N., Clerc J.-P., Loraud J. C. (2005b). Influence des brandons sur la propagation d'un feu de forêt, *Comptes Rendus Physique* 6, 1153-1160.
- Porterie B., Zekri N., Clerc J. P., Loraud J. C. (2007a). Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks, *Combustion and Flame*, Volume 149, Issues 1–2, April 2007, Pages 63-78, ISSN 0010-2180.
- Porterie B., Consalvi J. L., Loraud J. C., Giroud F., Picard C. (2007b). Dynamics of wildland fires and their impact on structures, *Combustion and Flame*, Volume 149, Issue 3, May 2007, Pages 314-328, ISSN 0010-2180.
- Porterie B., Kaiss A., Clerc J. P., Zekri L., Zekri N. (2008). Universal scaling in wildfire fractal propagation. *Applied Physics Letters*, 93(20), 204101.
- Putnam, A. A. (1965). "A model study of wind-blown free-burning fires" -- *Proceedings of the Tenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1039-1046.
- Qiao Y., Ong S. H. (2007). Arc-based evaluation and detection of ellipses, *Pattern Recognition* 40(7):1990–2003.
- Quintiere J. G. (1997). Principles of fire behavior. Delmar Publisher.
- Radeloff V. C., Hammer R. B., Stewart S. I., Fried J. S., Holcomb S. S., McKeefry, J. F. (2005). The wildland–urban interface in the United States. *Ecological applications*, 15(3), 799-805.
- Richards G. (1990). An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30:1163–1179.
- Richards G. (1995). A general mathematical framework for modeling two-dimensional wildland fire spread, *International Journal of Wildland Fire*, 5:63–72.
- Richards G., Bryce R. (1996). A computer algorithm for simulating the spread of wildland fire perimeters for heterogeneous fuel and meteorological conditions, *International Journal of Wildland Fire*, 5(2):73–79.
- Richards G. D. (1999). The mathematical modelling and computer simulation of wildland fire perimeter growth over a 3-Dimensional surface. *International Journal of Wildland Fire* 9(3): 213-221.
- Rothermel R. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper INT-438, USDA Forest Service.
- Rothermel R. C. (1991). Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. Research Paper INT-115, USDA Forest Service.
- Santoni P. A., Filippi J. B., Balbi J. H., Bosseur F. (2011). Wildland Fire Behaviour Case studies and Fuel Models for Landscape-Scale Fire Modeling, *Journal of Combustion*, ArticleID 613424, 12 pages.
- Santoni et Porterie (2012). Journée de formation de la Compagnie Nationale des Experts de Justice en Incendie Explosion, Paris, 11 10 2012

- Sardoy N., Consalvi J. L., Porterie B., Fernandez-Pello A. C. (2007). Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees, *Combust.Flame* 150 (2007) 151–169.
- Sardoy N., Consalvi J. L., Kaiss A., Fernandez-Pello A. C., Porterie B. (2008). Numerical study of ground-level distribution of firebrands generated by line fires, *Combustion and Flame*, 154(3), 478-488.
- Scire J. S., Robe F. R., Fernau M. E., Yamartino, R. J. (2000). A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5) ; Earth Tech Inc.: Concord, MA. Available at: <http://www.src.com>.
- Scott J. H., Burgan R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model, *The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography*, 66.
- Shafizadeh F. (1982). Introduction to pyrolysis of biomass, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 3(4):283–305.
- Shamir R. (2006). Appendix III. Portable Fire Growth Model: Ron Shamir (Country Fire Authority, Victoria). (“White Paper”). In: Gould, J. 2007. Overview of operational fire spread simulation modelling. *Briefing paper to the Australasian Fire Authorities Council, Rural and Land Management Agency Sub-group*. pp 30-35.
- Siggins A., Newnham G., Bianchi R., Leonard J. (2013). "A 3 dimensional ray tracing approach to modelling bushfire radiant heat flux for houses using LiDar derived vegetation voxel data and quadratic polygonal fire fronts," 2013 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS*, Melbourne, VIC, 2013, pp. 97-100.
- Silva J., Ribeiro C. Guedes R. (2007). “Roughness length classification of Corine LAND COVER classes,” -- *Proceedings of the European Wind Energy Conference*, 2007, p. 110.
- Simon M., Plummer S., Fierens F., Hoelzemann J. J., Arino, O. (2004). Burnt area detection at global scale using ATSR-2: The GLOBSCAR products and their qualification, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D14).
- Stauffer D., Aharony A. (1991). Introduction to Percolation Theory. London: *Taylor and Francis*.
- Stocks B. J., Mason J. A., Todd J. B., Bosch E. M., Wotton B. M., Amiro B. D., Flannigan M. D., Hirsch K. G., Logan K. A., Martell D. L., Skinner W. R. (2002). Large forest fires in Canada, 1959–1997, *J. Geophys. Res.*, 107, 8149.
- Stratton R. D. (2004). Assessing the effectiveness of landscape fuel treatments on fire growth and behavior. *Journal of Forestry*, 102(7), 32-40.
- Sullivan A.L. (2007). “Convective Froude number and Byram’s energy criterion of Australian experimental grassland fires,” -- *Proceedings of the Thirty-First Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 2007, pp. 2557-2564.
- Sullivan A. L. (2009). Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models, *International Journal of Wildland Fire* 18, 349-368
- Sullivan A. L. (2009). Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 2: Empirical and quasi-empirical models, *International Journal of Wildland Fire* 18, 369-386
- Sullivan A. L. (2009). Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 18, pp. 387–403.
- Susott R. A. (1982). Characterization of the thermal properties of forest fuels by combustible gas analysis. *Forest Science*, 28(2), 404-420.
- Syphard A. D., Brennan T. J., Keeley J. E. (2017). The importance of building construction materials relative to other factors affecting structure survival during wildfire, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 21, March 2017, Pages 140-147, ISSN 2212-4209.

-
- Tarifa C. S., del Notario P. P., Moreno F. G. (1965). On flight paths and lifetimes of burning particles of wood. In 'Tenth Symposium on Combustion', 17–21 August 1964, Cambridge, UK. pp. 1021–1037. (The Combustion Institute: Pittsburgh, PA)
- Téphany H., Nahmias J., Duarte J. A. (1997). Combustion on heterogeneous media. A critical phenomenon. *Physica A*, 57–69.
- Thomas P. H., Pickard R. W. (1961). "Fire spread in forests and heathland materials," Report Forest Research, Her Majesty's Stationary Office, London.
- Thomas P. H. (1963). "The size of flames from natural fires," -- *Proceedings of the Ninth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1963, pp. 844-859.
- Tolhurst K. G., Chong D. M., Strandgard M. N. (2006). Wildfire risk management model for strategic management. In: Viegas, D.X. (ed.). *Proceedings, 5th International Conference on Forest Fire Research*, 27-30 November 2006, Figueira da Foz, Coimbra, Portugal.
- Tolhurst K., Chong D., Pitts A. (2008a). Training notes for PHOENIX – a bushfire characterization model, Bushfire Cooperative Research Centre and The University of Melbourne, School of Forest and Ecosystem Science
- Tolhurst K. G., Shields B. J., Chong D. M. (2008b). Phoenix: development and application of a bushfire risk management model, *Australian Journal of Emergency Management* 23(4): 47-54.
- Toman E., Shindler B., McCaffrey S., Bennett J. (2014). Public Acceptance of Wildland Fire and Fuel Management: Panel Responses in Seven Locations, *Environmental Management*. 54: 557.
- Tse S. D., Fernandez-Pello A. C. (1998). On the flight paths of metal particles and embers generated by power lines in high winds – a potential source of wildland fires, *Fire Safety Journal* 30, 333–356.
- Van Wagner C. E. (1977). Effect of slope on fire spread rate. Canadian Forestry Service Bi-monthly Research Notes, 33(1).
- Van Wagner C. E. Forest P. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest FireWeather Index System. In Can. For. Serv., Forestry Tech. Rep.
- Vasconcelos M. J., Guertin D. P. (1992). FIREMAP-simulation of fire growth with a geographic information system, *International Journal of Wildland Fire*, 2(2), 87-96.
- Vasconcelos M. J. P., Paúl J. C. U., Gonçalves A. (1998). Geofogo – testing a fire growth simulator. In: Viegas, D.X. (ed.). *Proceedings, 3rd International Conference on Forest Fire Research and 14th Fire and Forest Meteorology Conference*, 16-20 November 1998, Luso, Coimbra, Portugal. pp 889-890.
- Vasquez T. (2011). The Russian inferno of 2010, *Weatherwise*, 62, pp. 20–25.
- Watts D. J., Strogatz S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, Jun 4, 393(6684):440-2.
- Williams F. (1982). Urban and wildland fire phenomenology, *Progress in Energy Combustion Science*, 8:317–354.
- Wolfram S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata, *Reviews of Modern Physics*, 55:601–644.
- Zekri N., Porterie B., Clerc J. P., Loraud J. C. (2005). Propagation in a two-dimensional weighted local small-world network. *Physical Review E*, 71(4), 046121.