



HAL
open science

Un modèle de propagation de feux de végétation à grande échelle

Drissi Mohamed

► **To cite this version:**

Drissi Mohamed. Un modèle de propagation de feux de végétation à grande échelle. Thermique [physics.class-ph]. Université de Provence - Aix-Marseille I, 2013. Français. NNT: . tel-00931806

HAL Id: tel-00931806

<https://theses.hal.science/tel-00931806>

Submitted on 15 Jan 2014

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

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



AIX-MARSEILLE UNIVERSITE
Ecole Polytechnique Universitaire de
Marseille



iusti
UMR 7343

Institut Universitaire des Systèmes
Thermiques Industriels - CNRS UMR 7343

Thèse

En vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

Discipline : MECANIQUE-ENERGETIQUE

Ecole Doctorale : Sciences pour l'Ingénieur: Mécanique, Physique, Micro-nanoélectronique

par

Mohamed DRISSI

Un modèle de propagation de feux de végétation à grande échelle

Directeur : Bernard Porterie, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille, IUSTI, Marseille

Co-Encadrant : Ahmed Kaiss, Maître de Conférences à l'Université d'Aix-Marseille, IUSTI, Marseille

Soutenue publiquement le 8 février devant la commission d'examen :

Rapporteurs

Paul-Antoine Santoni

Professeur, Université de Corse, SPE, Corte

Thomas Rogaume

Maître de Conférences, Université de Poitiers, Institut Pprime, Poitiers

Examineurs

Khaled Chetehouna

Maître de Conférences, ENSI de Bourges, Institut Pprime, Bourges

Nouredine Zekri

Professeur, USTO, Oran

Invité

Col. Claude Picard

Directeur du CEREN, Gardanne

Un modèle de propagation de feux de végétation à grande échelle

Résumé : Le présent travail est consacré au développement et à la validation d'un modèle hybride de propagation d'un incendie de végétation à grande échelle prenant en compte les hétérogénéités locales liées à la végétation, à la topographie du terrain et aux conditions météorologiques. Dans un premier temps, on présente différentes méthodes permettant de générer un réseau amorphe, représentatif d'une distribution réaliste de la végétation. Le modèle hybride est un modèle de réseau où les phénomènes qui se produisent à l'échelle macroscopique sont traités de façon déterministe, comme le préchauffage du site végétal provenant du rayonnement de la flamme et des braises et de la convection par les gaz chauds, mais aussi son refroidissement radiatif et son inflammation pilotée. Le rayonnement thermique provenant de la flamme est calculé en combinant le modèle de flamme solide à la méthode de Monte Carlo et en considérant son atténuation par la couche d'air atmosphérique entre la flamme et la végétation réceptive. Le modèle est ensuite appliqué à des configurations simples de propagation sur un terrain plat ou incliné, en présence ou non d'un vent constant. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les données de la littérature. Une étude de sensibilité a été également menée permettant d'identifier les paramètres les plus influents du modèle, en termes de vitesse de propagation du feu, et de les hiérarchiser. La phase de validation a porté sur l'analyse comparative des contours de feux calculés par le modèle avec ceux mesurés lors d'un brûlage dirigé réalisé en Australie et d'un feu réel qui a lieu en Corse en 2009, montrant un très bon accord en termes de vitesse de propagation, de contours de feu et de surface brûlée.

Mots clés: feu de végétation, incendie, modèle de réseau, réseau régulier, réseau amorphe, rayonnement, méthode de Monte Carlo, modèle de flamme solide, modèle SNB, algorithme génétique, inflammation, convection, pertes radiatives, dégradation thermique, validation, étude de sensibilité, brûlage dirigé, feux historiques.

-----0-----

Modeling the spreading of large-scale wildland fires

Abstract: The present work is devoted to the development of a hybrid model for predicting the rate of spread of wildland fires at a large scale, taking into account the local heterogeneities related to vegetation, topography, and meteorological conditions. Some methods for generating amorphous network, representative of real vegetation landscapes, are proposed. Mechanisms of heat transfer from the flame front to the virgin fuel are modeled: radiative preheating from the flame and embers, convective preheating from hot gases, radiative heat losses and piloted ignition of the receptive vegetation item. Flame radiation is calculated by combining the solid flame model with the Monte Carlo method and by taking into account its attenuation by the atmospheric layer between the flame and the receptive vegetation. The model is applied to simple configurations where the fire spreads on a flat or inclined terrain, with or without a constant wind. Model results are in good agreement with literature data. A sensitivity study is conducted to identify the most influential parameters of the model. Eventually, the model is validated by comparing predicted fire patterns with those obtained from a prescribed burning in Australia and from a historical fire that occurred in Corsica in 2009, showing a very good agreement in terms of fire patterns, rate of spread, and burned area.

Key words: wildland fire, network model, regular network, amorphous network, radiation, Monte Carlo method, solid flame model, SNB model, genetic algorithm, ignition, convection, radiative losses, thermal degradation, sensitivity study, prescribed burning, historical fire.

Adresse du laboratoire : IUSTI, AMU/CNRS, UMR 7343, Polytech'Marseille, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille cedex 13.

Table des matières

NOMENCLATURE	7
1 INTRODUCTION	11
1.1 Un double constat	11
1.1.1 Incendies de forêts et loi de Pareto	12
1.1.2 Le comportement fractal des incendies	14
1.2 Phénoménologie	16
1.2.1 Les mécanismes	16
1.2.2 Echelles mises en jeu – Modèles existants	18
1.3 Les modèles de propagation	19
1.3.1 Les modèles déterministes	20
1.3.2 Les modèles stochastiques	22
1.3.2.1 Modèles de percolation	22
1.3.2.2 Automates cellulaires	25
1.3.2.3 Modèles de réseau de petit monde	26
1.4 Objectifs et plan du mémoire	28
2 PRESENTATION DU MODELE DE PROPAGATION	30
2.1 Construction du réseau	30
2.1.1 Degré d'amorphisme	31
2.1.2 Méthodes de génération du réseau	32
2.1.3 Intégration du réseau au modèle numérique du terrain (MNT)	39
2.2 Modèle macroscopique de combustion	41
2.2.1 Bilan d'énergie sur un site récepteur donné	41
2.2.1.1 Conservation de l'énergie d'un site exposé au feu	43
2.2.1.2 Effet d'écran	50
2.2.1.3 Critère d'inflammation	51
2.2.2 Modèle de rayonnement	52
2.2.2.1 Modèle de flamme solide (MFS)	53
2.2.2.2 Méthode Monte Carlo (MMC)	57
2.2.2.3 Atténuation par la couche d'air traversée	63
2.2.3 Cas d'étude	70
2.2.4 Allumage ponctuel et en ligne	73
3 CAS D'ETUDE	74
3.1 Propagations isotropes et anisotropes	74
3.2 Seuil de percolation	82
3.3 Etude de sensibilité	85
4 VALIDATION DU MODELE DE PROPAGATION	94
4.1 Validation sur un brûlage dirigé	94

4.2	Validation sur le feu historique de Favone (Corse, 2009)	101
4.2.1	Chronologie et comportement de l'incendie	101
4.2.2	Description du site de Favone	102
4.2.3	Conditions environnementales	103
5	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	107
	RÉFÉRENCES	110

Tableau 1 : Echelles mises en jeu dans un incendie de forêt selon Sullivan (2008).	18
Tableau 2 : Modèles déterministes et stochastiques de propagation d'un feu de végétation.	21
Tableau 4 : Paramètres de la régression linéaire de la transmittance moyenne en fonction de l'humidité relative de la couche d'air traversée.	67
Tableau 5 : Propriétés géométriques et thermo-physiques du combustible végétal, ici de chêne kermès, et du milieu végétal.	71
Tableau 7 : Propriétés géométriques et thermo-physiques du combustible végétal, ici les éléments fins d'Arbustus Unedo, et du milieu végétal (Santoni et al., 2011). Dans ce cas, $\alpha = 0.002$ et $\delta = 0.36m$. Le pouvoir émissif de la flamme est de 85 kW/m^2 .	84
Tableau 8 : Analyse de sensibilité : niveau de référence, niveaux bas et haut des différents facteurs.	88
Tableau 9 : Expérience F19 : propriétés du combustible végétal, Themeda australis, et de la strate végétale.	97
Tableau 10 : Expérience F19 : conditions environnementales (Cheney et al., 1993).	97
Tableau 11 : Les complexes combustibles principaux identifiés dans l'île de Corse.	103
Tableau 12 : Variables d'entrée pour le calcul de la propagation du feu de Favone.	105

Liste des figures

Figure 1 : (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.	13
Figure 2 : Image du satellite MODIS montrant la surface parcourue par un incendie en juillet 2003 dans le nord de l'Italie.	15
Figure 3: Propagation d'un incendie par un modèle de percolation sur un domaine de 100×100 sites : (à gauche) dopage de 58%, (à droite) dopage de 59%.	23
Figure 4 : (a) Rapport du nombre de sites brûlés au nombre total de sites actifs en fonction du dopage, (b) sa dérivée en fonction du dopage. Le domaine comprend 100×100 sites.	24
Figure 5: 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 courbe rouge.	27
Figure 6. Réseau amorphe et histogramme des classes de distances (en m) entre deux sites voisins. Le rayon des sites est de 1m et le dopage est de 0.56.	32
Figure 7 : Réseaux réguliers s'appuyant sur des structures sous-jacentes (a) carrée et (b) triangulaire (ou hexagonale).	33
Figure 8 : Réseau amorphe polydisperse de dopage 0.6.	34
Figure 9 : Maillage triangulaire non structuré de Delaunay et zoom sur une partie du réseau obtenu par minimisation de fonctionnelle.	35
Figure 10 : Organigramme décrivant les étapes de l'algorithme génétique.	37
Figure 11. Exemple de réseau amorphe monodisperse de dopage 0.7 généré à l'aide de l'AG. Le domaine est de $100m \times 100m$ et le rayon d'un site est de 1m. Les paramètres de l'AG sont : une population de 50 individus, un taux de sélection de 75%, un taux de mutation de 35% et un nombre de générations de 10.	38
Figure 12. Schéma illustrant le calcul de l'altitude d'un site du réseau amorphe.	39
Figure 13. Cartographie topographique et histogramme des pentes de la zone de Lançon de Provence. La courbe Lorentzienne semble mieux décrire cette distribution de pentes que la courbe gaussienne.	40
Figure 14 : Le site végétal est assimilé à un cylindre de hauteur H et de diamètre D. δ_{eff} est la longueur effective de pénétration du rayonnement dans la strate végétale.	42
Figure 15 : Les différentes contributions énergétiques d'un site exposé au feu en présence de vent et sur un terrain plat ou en pente.	44
Figure 16 : Ecrantage : le site en feu intercalé entre le site en feu (i) et le site récepteur (j) joue le rôle d'écran.	50
Figure 17 : (o) Evolution au cours du temps de la perte de masse mesurée par le NIST lors de la combustion de pins Douglas. En trait pointillé, le débit masse est supposé constant pendant le temps de combustion avec flamme, tc.	57
Figure 18. Faisceau d'énergie partant de la maille de la flamme assimilée à un cylindre dans le cadre du modèle de flamme solide.	62
Figure 19 : Luminance spectrale du rayonnement émis par un CN à 1100 K (en pointillés), puis atténué par une couche d'air (en trait plein) de: (a) 1 m, (b) 10 m, (c) 100 m, (d) 1000 m.	65
Figure 20 : Transmittance moyenne de l'air en fonction de l'épaisseur de la couche d'air traversée pour différentes hygrométries.	66
Figure 21 : Erreurs engendrées sur la transmittance moyenne de la couche d'air lorsque l'on fait varier (a) la température à laquelle émet le CN, (b) l'humidité relative et (c) l'épaisseur de la couche d'air traversée.	68
Figure 22 : Localisation du site en feu (n° 1225) et du site voisin (n° 1226).	72

Figure 23 : Evolutions au cours du temps de la température et de la teneur en eau du site 1226, ainsi que des contributions des différents termes de l'équation de bilan d'énergie, en absence de vent.....	72
Figure 24. Evolution au cours du temps de la température et contributions des différents termes de l'équation de bilan d'énergie pour le site 1226. Le vent a une vitesse de 5 m.s ⁻¹ et souffle dans la direction Sud-Nord.....	73
Figure 25: Propagation du feu sur un terrain plat (a) en absence de vent et (b) en présence d'un vent de 5m/s dans la direction Y. L'allumage est en ligne.	74
Figure 26 : Quelques exemples de contours de feu après 200s de propagation sur terrain plat et en absence de vent : réseaux réguliers carrés avec (a) HR=25% et (b) HR=100%, réseaux amorphes de dopage 0.5 avec (c) HR=25% et (d) HR=100%, et réseaux amorphes de dopages (e) 0.4 et (f) 0.3 avec HR=25%. On distingue les sites intacts occupés (vert), les sites en feu (rouge) et les sites brûlés (noir). La température des sites de couleur orangée est comprise entre 310K et 1100K.	76
Figure 27 : Evolutions au cours du temps de la position de la tête de feu et du nombre de sites en feu.	77
Figure 28 : Vitesse de propagation en fonction de l'angle de pente.....	78
Figure 29 : Fronts de feu sur une pente ascendante de (a) 10° après 308s de propagation , (b) 20° après 234s de propagation, (c) 30° après 172s de propagation, et (d) 40° après 118s de propagation, en absence du vent, avec HR=25%. Le réseau est régulier et dopé à 100%. On distingue les sites intacts occupés (vert), les sites en feu (rouge) et les sites brûlés (noir). La température des sites de couleur orangée est comprise entre 310K et 1100K.....	79
Figure 30 : Quelques exemples de contours de feu après propagation sur terrain plat (a) en absence de vent à t= 470s et en présence d'un vent de (b) 1m/s à t= 250s, (c) 2m/s à t= 160s, (d) 4m/s à t= 90s et (e) 6m/s à t= 60s. Le réseau est régulier et dopé à 100%. L'humidité relative de l'air est de 25%. On distingue les sites intacts occupés (vert), les sites en feu (rouge) et les sites brûlés (noir). La température des sites de couleur orangée est comprise entre 310K et 1100K.....	80
Figure 31 : Evolution du taux de propagation du feu en fonction de la vitesse du vent sur un réseau régulier 100m×100m pour une végétation de type chêne kermès. La courbe en rouge est une courbe de tendance d'équation : $ros = a + bUc$	81
Figure 32 : Front de feu sur une pente ascendante de 20° en présence d'un vent de 3m/s dans la direction des Y positifs après 151s de propagation, avec HR=25%. Le réseau est régulier et dopé à 100%. On distingue les sites intacts occupés (vert), les sites en feu (rouge) et les sites brûlés (noir). La température des sites de couleur orangée est comprise entre 310K et 1100K.....	82
Figure 33 : Fluctuations du temps moyen de propagation d'un ensemble de 100 feux. Le réseau est amorphe et constitué d'éléments de végétation de 1m de rayon. L'allumage est ponctuel.	83
Figure 34 : (a) Contour final du feu après propagation sur un terrain plat et en présence d'un vent de 12m/s. L'allumage en ligne a été initié sur le côté droit d'un réseau amorphe de 500×500 m dopé à 33%. (b) Evolutions de la surface brûlée adimensionnée et du temps de propagation en fonction du dopage pour des vitesses de vent de 0, 6 et 12 m/s. La ligne verticale correspond au seuil de percolation.	86
Figure 35 : Analyse de sensibilité : diagramme de Pareto permettant de hiérarchiser les facteurs influents et leurs interactions en fonction des effets produits sur la vitesse de propagation du feu.	89
Figure 36 : Analyse de sensibilité : diagramme des effets principaux sur la vitesse de propagation.	90
Figure 37 : Graphe montrant, pour l'ensemble des 64 essais, l'erreur relative entre la vitesse de propagation approchée à différents ordres et la vitesse de propagation calculée par le modèle.	92
Figure 38 : Expérience F19 : Représentation schématique des conditions d'allumage et du front du feu (Mell et al., 2004).....	95
Figure 39: Expérience F19 après 56s de propagation: photographie aérienne du front de feu et comparaison modèle/expérience (symboles).	99
Figure 40 : Expérience F19 après 86s de propagation: photographie aérienne du front de feu et comparaison modèle/expérience (symboles).	100
Figure 41 : Site de Favone : topographie du terrain, périmètre du feu (en noir) et types de végétation comme définis dans le Tableau 10 (Santoni & al., 2011).....	102
Figure 42 : Point d'allumage et propagation ultérieure. (Santoni et al., 2011)	104
Figure 43 : Contours du feu (en rouge) simulés toutes les 5 minutes. La ligne jaune délimite la surface réellement ravagée par le feu.	104

NOMENCLATURE

a	<i>Absorptivité</i>
$char$	<i>Résidu carbonneux (tas : char)</i>
c_p	<i>Chaleur spécifique</i>
dA	<i>Élément de surface</i>
F	<i>Fonction de répartition</i>
FMC	<i>Teneur en eau du végétal</i>
Fr	<i>Nombre de Froude</i>
g	<i>Vecteur accélération de la pesanteur</i>
h	<i>Coefficient de transfert de chaleur par convection, enthalpie</i>
HR	<i>Humidité relative de l'air atmosphérique</i>
I	<i>Intensité radiative</i>
k	<i>Conductivité thermique</i>
L	<i>Longueur</i>
L_{vap}	<i>Chaleur latente de vaporisation de l'eau</i>
L_{pyr}	<i>Chaleur latente de pyrolyse du combustible végétal</i>
m	<i>Masse</i>
\vec{n}	<i>Vecteur normal</i>
N	<i>Nombre de quanta émis par la flamme</i>
Nu	<i>Nombre de Nusselt</i>
p	<i>Puissance élémentaire transportée par chaque quantum, dopage</i>
P	<i>Puissance, Pouvoir émissif</i>
Pr	<i>Nombre de Prandtl</i>
\dot{q}	<i>Flux de chaleur</i>
ros	<i>Vitesse de propagation du feu (tas : rate of spread)</i>
R	<i>Nombre aléatoire, rayon d'un site végétal</i>

Re	<i>Nombre de Reynolds</i>
S	<i>Surface</i>
t	<i>Temps</i>
T	<i>Température</i>
U	<i>Vitesse du vent</i>
V	<i>Volume</i>
y	<i>Distance entre un site en feu et un site récepteur</i>

Symboles grecs

α	<i>Fraction volumique de la phase solide, angle d'inclinaison de la flamme</i>
β	<i>Coefficient d'extinction</i>
χ_R	<i>Fraction de la chaleur de combustion rayonnée par la flamme</i>
δ_{ij}	<i>Symbole de Kronecker</i>
δ	<i>Libre parcours moyen ou profondeur de pénétration du rayonnement dans le milieu végétal</i>
Δh_c	<i>Chaleur de combustion</i>
ε	<i>Emissivité</i>
κ	<i>Coefficient d'absorption</i>
μ	<i>Viscosité dynamique</i>
ν	<i>Viscosité cinématique</i>
ν_{char}	<i>Teneur initiale en résidu charbonneux des éléments fins secs</i>
ρ	<i>Masse volumique</i>
σ	<i>Constante de Stephan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)</i>
σ_k	<i>Rapport surface/volume de la phase solide (tas : surface-to-volume ratio)</i>
Ω	<i>Angle solide</i>
$\boldsymbol{\Omega}$	<i>Direction optique</i>

Indices et exposants

<i>.</i>	<i>Par unité de temps</i>
<i>''</i>	<i>Par unité de surface</i>
<i>'''</i>	<i>Par unité de volume</i>
<i>b</i>	<i>Corps noir, braises</i>
<i>char</i>	<i>Résidu charbonneux</i>
<i>conv</i>	<i>Convectif</i>
<i>cr</i>	<i>Critique</i>
<i>fl</i>	<i>Flamme</i>
<i>fb</i>	<i>Milieu végétal (tas : fuel bed)</i>
<i>g</i>	<i>Gaz</i>
<i>ign</i>	<i>Inflammation</i>
<i>k</i>	<i>Phase solide</i>
<i>pyr</i>	<i>Pyrolyse</i>
<i>rad</i>	<i>Radiatif</i>
<i>site</i>	<i>Site végétal</i>
<i>eff</i>	<i>Effectif</i>
<i>0</i>	<i>Initial</i>
<i>∞</i>	<i>Ambiant</i>

Abréviations et acronymes

<i>AG</i>	<i>Algorithme génétique</i>
<i>DFE</i>	<i>Eléments fins et secs de végétation (tas : dry fine fuel)</i>
<i>FMC</i>	<i>Teneur en eau du végétal (tas : fuel moisture content)</i>
<i>FPC</i>	<i>Teneur en produits de pyrolyse du végétal (tas : fuel pyrolysis content)</i>
<i>GPS</i>	<i>Système de positionnement global (tas : Global Positioning System)</i>

<i>MFS</i>	<i>Modèle de flamme solide</i>
<i>MMC</i>	<i>Méthode de Monte Carlo</i>
<i>MNT</i>	<i>Modèle numérique du terrain</i>
<i>tas</i>	<i>Terminologie anglo-saxonne</i>
<i>WFF</i>	<i>Eléments fins et humides de végétation (tas : wet fine fuel)</i>

1 INTRODUCTION

1.1 Un double constat

D'après les travaux de Chuvieco (2009) sur la répartition globale des feux de végétation, estimée par satellite, on sait maintenant que *près de 30% de la planète est impliqué de façon significative par ces feux*. Chaque année, des millions d'hectares de végétation brûlent à travers le monde, dont la moitié en Afrique sub-saharienne. Cette expression générique « feux de végétation » regroupe l'ensemble des feux impliquant la matière végétale (feux de forêts, brûlis, feux agricoles, etc.)

Dans le bassin méditerranéen, en moyenne, près de 600 000 hectares de forêts partent en fumée. Depuis près d'une décennie, d'immenses régions forestières de la planète s'embrasent tour à tour. Des feux sans précédent ont touché l'Indonésie en 1997, brûlant près de 5 millions d'hectares et posant des problèmes graves de santé publique. En 1998, c'est au tour de l'Amazonie, du Mexique et des Philippines. En 2003, 2004 et 2005, des centaines de milliers d'hectares de forêts des pays du pourtour méditerranéen, dont le Maroc, l'Algérie, la Grèce, l'Italie, la France et l'Espagne, ont été la proie des flammes.

Depuis plusieurs années, la Californie subit de manière récurrente des incendies aux conséquences humaines et économiques dramatiques, en raison notamment de la multiplication des interfaces périurbaines et du mitage. Ce phénomène qui tend également à se développer chez nous, induit un risque d'incendie plus élevé, que ce soit en termes de nombre de départs de feu ou de vulnérabilité.

Si les effets du changement climatique et de la sécheresse favorisent les incendies de forêts, l'influence anthropique reste la principale cause des incendies dans le monde puisque 90% des feux de forêts sont liés à des activités humaines : agriculture, déforestation, accidents et pyromanes (Robin et al., 2006). Ce faisant, ils contribuent eux-mêmes à ces changements par l'émission de particules et de gaz à effet de serre qu'ils génèrent.

1.1.1 Incendies de forêts et loi de Pareto

Avec le changement climatique, on peut donc s'attendre à une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des incendies de forêts. Comme de nombreux phénomènes naturels ou anthropiques (distribution des revenus, des tremblements de terre ou des crues en fonction de leur intensité, des villes en fonction de leur taille, etc.), la distribution du nombre de feux en fonction de la surface brûlée suit une loi de puissance dite loi de Pareto¹, du nom du célèbre économiste/sociologue Suisse, Vilfredo Pareto. En d'autres termes, *un feu de grande amplitude est relativement rare, alors qu'inversement, un feu de faible ampleur a de fortes chances de se produire*. Une analyse réalisée sur l'état et les tendances des grands incendies de forêts (> 2km²) survenus au Canada, à partir du contenu de la base de données sur les grands incendies (Stocks *et al.*, 2003) et de données de télédétection, a montré que 3 % environ du nombre total d'incendies signalés sont responsables de 97 % des superficies brûlées. Le même comportement a été constaté dans le Colorado de 1986 à 1995, où moins de 1% des feux ont été responsables de près de 80% de la surface brûlée totale. Si l'on s'intéresse maintenant à la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, on constate un comportement similaire. La Figure 1, établie à partir de la base Prométhée (2011) donne la superficie parcourue annuellement par les incendies dans la région PACA entre 1973 et 2010, répartie en différentes classes. Elle montre que la contribution des grands feux à la surface brûlée totale est la plus importante. C'est aussi ce que l'on observe en traçant, en échelles logarithmiques, la fréquence des feux recensés en fonction de leur superficie adimensionnée par la superficie minimale observée (Figure 1b). La distribution obtenue est bien une distribution de Pareto. La loi de Pareto s'applique également pour caractériser la probabilité d'éclosion d'un feu en fonction de la distance aux voies de communication (Carty *et al.*, 2007 ; Mangiavillano, 2008).

¹ 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 végétation, $x_{min} \approx 1$ ha et $k \approx 0.833$. A noter que si l'indice de Pareto est inférieur ou égal à 1, l'espérance mathématique est infinie.

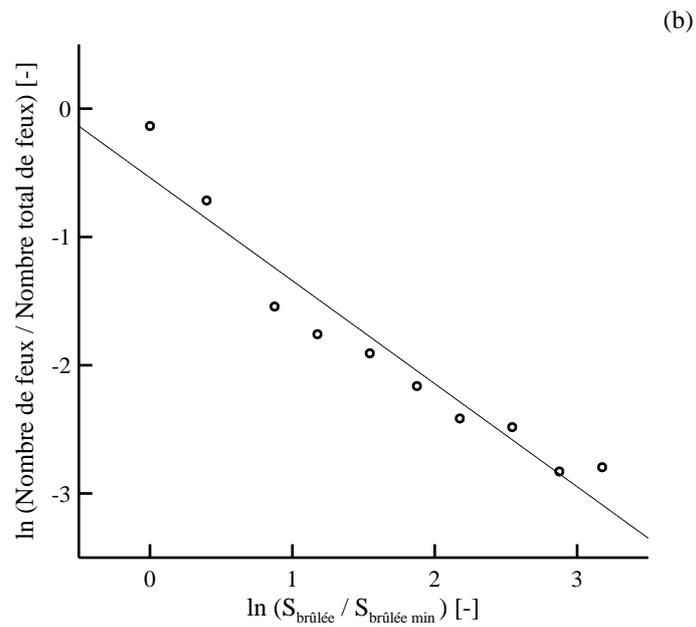
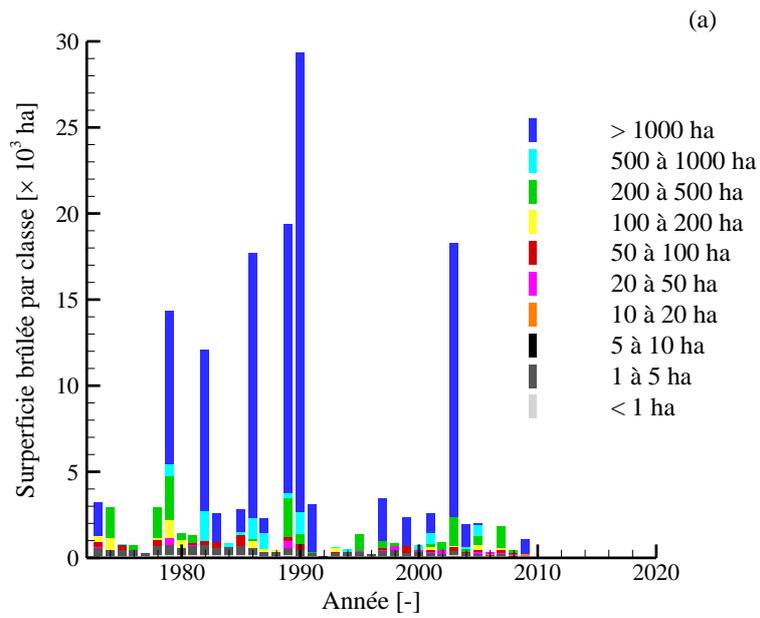


Figure 1 : (a) Superficie parcourue annuellement par les incendies en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur entre 1973 et 2010 et répartie en différentes classes, (b) fréquence de feux en fonction de la superficie adimensionnée, en échelles logarithmiques.

1.1.2 Le comportement fractal des incendies

La Figure 2 représente une image prise par le satellite MODIS en juillet 2003 dans le nord de l'Italie quelques jours après un important incendie.

De cette image satellite, on distingue parfaitement les zones ravagées par le feu, mais aussi la formation d'amas, de lacunarités (des zones laissées intactes au milieu de zones brûlées) et de digitations. Si on calcule les dimensions fractales du périmètre de feu et de la surface brûlée², on obtient respectivement $D_p \approx 1,3$ et $D_{sb} \approx 1,9$, c'est-à-dire des valeurs comprises entre 1 (dimension euclidienne d'une courbe) et 2 (dimension euclidienne d'une surface). Ces valeurs non entières traduisent ***un comportement fractal du feu dû aux hétérogénéités locales que le feu a rencontrées lors de sa propagation*** et qui sont liées aux conditions météorologiques (direction et intensité du vent, humidité relative et température de l'air ambiant), à la topographie du lieu et à la végétation (type de peuplement, distribution spatiale).

Un feu qui se propagerait dans un vent constant en direction et en intensité sur un paysage peu accidenté présentant une végétation homogène aurait des dimensions fractales proches de 1 pour le front et de 2 pour la surface brûlée. Ce n'est que rarement le cas pour les grands feux de forêts.

² Pour mesurer la dimension fractale, on dispose de deux méthodes :

La méthode 'box counting' consiste à superposer une grille à mailles carrées de taille décroissante et compter le nombre $N(r)$ de boîtes occupées par le front à l'échelle r . Pour les objets fractals, on observe une relation du type $N(r) \propto r^{-D_f}$ où D_f est la dimension fractale.

La méthode dite 'average mass-length relation' mesure la relation entre le nombre moyen $M(r)$ de points du domaine situés à une distance r autour de chacun des points du domaine. Cette méthode consiste à compter le nombre de sites $M(r)$ situés dans un cercle de rayon r centré autour d'un point du système, de moyenner cette valeur sur tous les points et ce, pour différentes valeurs de r . Dans ce cas, on a : $M(r) \propto r^{D_f}$.

Les deux méthodes donnent sensiblement les mêmes résultats.

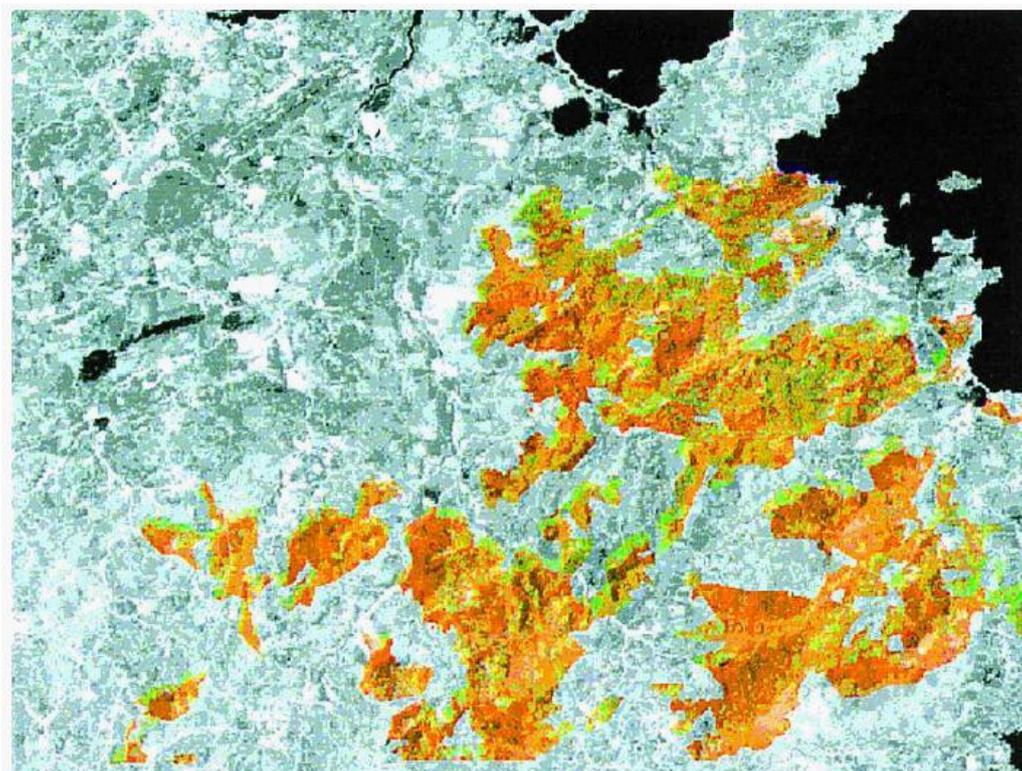


Figure 2 : Image du satellite MODIS montrant la surface parcourue par un incendie en juillet 2003 dans le nord de l'Italie.

Ces observations ont conduit certains auteurs (Caldarelli et al., 2001; Adou et al., 2010) à caractériser les conséquences d'un incendie par ses propriétés fractales. Des travaux de recherche menés actuellement au laboratoire étudient la possibilité d'utiliser la signature fractale du feu pour caractériser la dynamique de propagation du feu.

L'analyse fractale permet en outre une estimation de la surface réellement brûlée. Cette donnée est capitale si l'on souhaite, par exemple, évaluer quantitativement les émissions de particules et de gaz dans l'atmosphère générées par un incendie. Ces émissions, on le sait maintenant, ont un impact non négligeable sur le changement climatique.

Avant de tirer parti de ce double constat, il nous faut revenir sur la phénoménologie des incendies de végétation et plus particulièrement sur la notion d'échelle d'observation.

1.2 Phénoménologie

1.2.1 Les mécanismes

Un incendie de forêt est communément défini comme la manifestation incontrôlée dans l'espace et dans le temps d'une réaction de combustion. Elle s'accompagne d'une libération de chaleur et d'émission lumineuse. Pour qu'un incendie se déclare et se propage, trois éléments doivent être présents : un combustible (la végétation), un gaz comburant (l'oxygène de l'air) et une source d'inflammation (flamme, matériau incandescent).

La végétation est un milieu complexe diphasique et multi-constituant. Elle peut comporter jusqu'à quatre strates distinctes : la litière, la strate herbacée, le ligneux bas, le ligneux haut. La litière ou couverture morte, est formée de débris végétaux tombés à terre. La strate herbacée est constituée par les plantes annuelles et les plantes dont seule la partie souterraine est vivace. Le ligneux bas, formé par la broussaille, arbustes et jeunes arbres de moins de deux mètres, constitue l'essentiel de la garrigue et du maquis. Le ligneux haut regroupe les arbres de plus de deux mètres. Dans le bassin méditerranéen, cette catégorie est essentiellement constituée par des taillis feuillus (*e.g.* chêne vert, chêne pubescent) et des futaies de résineux (*e.g.* pin d'Alep, pin sylvestre).

L'éclosion et la propagation d'un feu font intervenir des mécanismes physiques et chimiques à différentes échelles de temps et d'espace. Sous l'effet d'une source de chaleur, l'eau contenue dans la végétation s'évapore. A environ 300°C commence la pyrolyse, réaction qui conduit à la formation de gaz condensables (les goudrons), de gaz légers (CO, H₂, CO₂, H₂O, C_xH_y) et d'une matrice résiduelle riche en carbone, appelée résidu carbonneux. Les produits gazeux de pyrolyse, s'ils sont en concentration suffisante, réagissent avec l'oxygène de l'air pour former une flamme de diffusion turbulente chargée en suies. Plus la chaleur dégagée par les flammes est importante, plus la végétation en avant du front de flamme est chauffée, ce qui favorise le séchage et la pyrolyse du combustible, et par conséquent la propagation du feu.

La teneur en eau du combustible forestier joue un rôle important puisque, avant de s'enflammer, le combustible doit avoir perdu une grande partie de son eau par évaporation. Pour cela, une partie de l'énergie libérée par la combustion est utilisée (2255 Joules par gramme d'eau). Les végétaux vivants, généralement riches en eau, sont donc moins inflammables et moins combustibles que les végétaux morts.

Le rapport surface/volume de l'élément végétal est aussi un paramètre essentiel puisque tous les transferts (masse, quantité de mouvement et énergie) avec le milieu environnant en dépendent. C'est la raison pour laquelle ce sont les éléments les plus fins qui contrôlent la vitesse de propagation de l'incendie, alors que les éléments végétaux plus épais, qui brûlent plus lentement, participent à la libération d'énergie en arrière du front de feu.

La combustion homogène (en phase gazeuse) entre les produits de pyrolyse du combustible et l'oxygène de l'air implique des molécules complexes qui se décomposent en radicaux pour se réarranger en molécules plus petites et plus stables. Ce phénomène peut être très complexe. Par exemple, la combustion du méthane (CH_4), qui est un des possibles produits de pyrolyse de la végétation, peut être décrite par plusieurs centaines de réactions faisant intervenir plusieurs dizaines d'espèces chimiques. En pratique, la combustion homogène est traitée via un schéma réactionnel simplifié. D'un point de vue chimique, la réaction de combustion est généralement incomplète, impliquant la présence d'oxygène (O_2) et d'imbrûlés comme le monoxyde de carbone (CO), le méthane (CH_4), l'hydrogène (H_2) et des particules de suies.

Il est d'usage d'évaluer *a posteriori* la puissance linéique d'un incendie de végétation ($W.m^{-1}$) grâce à la formule de Byram (1959) :

$$P' = ros m''_{DFF} \Delta h_{DFF} \quad (1)$$

où ros est la vitesse de propagation du front de feu ($m.s^{-1}$), m''_{DFF} la masse d'éléments fins secs de végétation (DFF pour « Dry Fine Fuel ») consommée par unité de surface ($kg.m^{-2}$), et Δh_{DFF} la chaleur libérée par leur combustion ($J.kg^{-1}$). Cette puissance peut dépasser $100 MW.m^{-1}$ dans les grands feux de cimes australiens alors que les feux d'Indonésie dépassent rarement $1 MW.m^{-1}$.

La formule de Byram doit être utilisée en identifiant parfaitement chacun des termes qui la constituent. Elle reste néanmoins limitée puisqu'elle nécessite de connaître la vitesse de propagation et la masse d'éléments secs qui ont participé à la combustion, des données qui dépendent du feu lui-même (!). Une autre limite de la formule de Byram vient des hypothèses de stationnarité de la propagation et de continuité de la végétation utilisées pour sa dérivation. On comprend bien que ces hypothèses cessent d'être valables dans le cas d'un feu présentant un comportement fractal marqué (Figure 2).

1.2.2 Echelles mises en jeu – Modèles existants

La difficulté à modéliser le comportement d'un incendie de végétation réside dans sa nature multi-physique multi-échelle. En effet, les phénomènes physiques dont le feu est le siège sont fortement couplés et se produisent sur une multitude d'échelles d'espace et de temps. Sullivan (2008) répertorie les échelles correspondant aux principaux phénomènes physiques dont le feu est le siège (Tableau 1). Par exemple, la combustion fait intervenir des échelles d'espace inférieures au millimètre alors que le panache convectif peut s'étendre sur des distances kilométriques.

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

Tableau 1 : Echelles mises en jeu dans un incendie de forêt selon Sullivan (2008).

Dans le domaine des feux de végétation, on distingue généralement deux échelles: l'échelle macroscopique (celle de la flamme de diffusion turbulente ou du pompier qui lutte sur le terrain) et l'échelle gigascopique (celle des images aériennes ou satellitaires, où le front de feu peut être vu comme une ligne séparant le combustible brûlé et imbrûlé et se déplaçant sur une surface). Quant aux phénomènes qui se produisent aux échelles inférieures, les échelles microscopique (celle de la cellule végétale) 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.

Les modèles conçus à l'échelle macroscopique sont des modèles de combustion, appelés également modèles détaillés ou physiques (Grishin, 1996 ; Porterie et al., 2000, 2007 ; Mell et al., 2007). 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 chaque phase 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 doivent donc être considérés 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 à l'échelle gigascopique.

A l'échelle gigascopique, on parle de modèles de propagation. Ils sont de plusieurs types, selon la physique qu'ils contiennent ou mieux selon la nature de l'approche qu'ils utilisent : les modèles déterministes et les modèles stochastiques.

1.3 Les modèles de propagation

L'idée ici n'est pas de fournir une liste exhaustive de tous les travaux passés, plusieurs articles leur sont déjà consacrés (voir par exemple les articles de synthèse de Pastor et al. (2003) ou Sullivan (2008)) mais plutôt de montrer, par rapport à l'existant, l'originalité de la présente approche et son adéquation avec le double constat fait précédemment.

1.3.1 Les modèles déterministes

Les modèles déterministes de propagation sont des modèles semi-empiriques (ou semi-physiques) qui nécessitent la détermination de paramètres dépendant du feu lui-même, ce qui restreint considérablement leur domaine de validité. Ces modèles présentent un intérêt opérationnel indéniable, mais leur utilisation doit être limitée aux conditions (météorologie, topographie du terrain, végétation, etc.) dans lesquelles ils ont été établis. Ils n'ont pas un caractère prédictif.

Le Tableau 2 présente une liste non-exhaustive de ces modèles. Nous avons également fait figurer dans ce tableau le critère d'inflammation retenu.

Auteurs	Type de modèle	Caractéristiques	Critère d'inflammation
Hottel et al. (1965), Thomas (1967)	déterministe	Conservation de l'énergie pour le combustible solide	Température d'inflammation
Frandsen (1971), Rothermel (1972)	déterministe	Conservation de l'énergie pour le combustible solide	Energie critique d'inflammation
Pagni et al. (1973, 2005), Konev et Sukhinin (1977)	déterministe	Conservation de l'énergie pour le combustible solide	Température d'inflammation
Albini (1986)	déterministe	Equation de transfert radiatif à travers le lit de combustible; Conservation de l'énergie pour le combustible solide	Température d'inflammation
De Mestre et al. (1989), Weber (1989)	déterministe	Conservation de l'énergie pour le combustible solide	Température d'inflammation
Catchpole et al. (1998)	déterministe	Conservation de l'énergie pour le combustible solide	Energie critique d'inflammation
Margerit et Séro-Guillaume (2002)	déterministe	Conservation de l'énergie et de la masse pour le combustible solide	Température d'inflammation

Simeoni et al. (2001)	déterministe	Conservation de l'énergie (équilibre thermique entre phases)	Température d'inflammation
Balbi et al. (2009)	déterministe	Conservation de l'énergie et de la masse pour le combustible solide et la phase gazeuse	Température d'inflammation
Albinet et al. (1986)	hybride	Réseau régulier	Temps d'inflammation pour un site
Hargrove et al. (2000)	stochastique	Réseau régulier, prise en compte des sautes de feu	Probabilité d'inflammation pour un site
Berjak et Hearne (2002)	stochastique	Réseau régulier	Temps d'inflammation pour un site
Porterie et al. (2005, 2007)	stochastique	Réseau social de « petit monde » avec sautes de feu	Temps d'inflammation pour un site
Alexandridis et al. (2008)	stochastique	Réseau régulier	Probabilité d'inflammation pour un site
Muzzy et al. (2008, 2009)	hybride	Réseau régulier	Température d'inflammation
Yassemi et al. (2008)	stochastique	Réseau régulier	Contagion continue à partir d'un site voisin lorsque ce dernier est complètement brûlé
Adou et al. (2010)	hybride	Réseau social de « petit monde » et calcul du rayonnement par Monte Carlo	Energie critique d'inflammation

Tableau 2 : Modèles déterministes et stochastiques de propagation d'un feu de végétation.

Ils reposent sur la conservation de l'énergie pour la phase solide et sont basés sur l'idée que le combustible en feu et le combustible encore intact sont séparés par « une interface d'inflammation » souvent définie par une température critique ou une énergie critique d'inflammation du combustible solide. Ils peuvent prendre en compte, de manière simplifiée, certains facteurs qui influent sur la progression du front de feu, tels que le débit de pyrolyse, la combustion en phase gazeuse, le transfert de chaleur vers le combustible imbrûlé, les propriétés thermo-physiques et géométriques du lit combustible et sa teneur en eau, la topographie du terrain et les conditions environnementales.

1.3.2 Les modèles stochastiques

Les feux de forêt peuvent être vus comme un système dynamique complexe³. Les limitations que cela implique viennent de l'impossibilité de mettre le système en équations solubles et prédictives. Le nombre de paramètres du système et leur sensibilité est un élément clé qui permet de juger de la complexité d'un système. Un des effets caractéristiques de ces systèmes est leur non linéarité. Ceci se traduit par une variation discontinue de la réponse du système à variation continue d'un de ses paramètres.

1.3.2.1 Modèles de percolation

Dans le modèle de percolation de sites sur un réseau à mailles carrées, le voisinage de von Neumann (1966) est le plus fréquemment utilisé. Selon cette règle de voisinage, un site donné possède quatre voisins : un dans chaque direction cardinale. La propagation du feu sur ce réseau va dépendre du dopage, défini comme le rapport entre le nombre de sites actifs (des arbres, par exemple) et le nombre total de sites. C'est ce que l'on observe sur les résultats des simulations sur un domaine de 100×100 sites (Figure 3) où la surface brûlée augmente avec le dopage.

³ De nombreux systèmes sont constitués d'un grand nombre d'entités en interaction (dynamique des populations, réseau neuronal, etc.). On les qualifie de complexes lorsqu'un observateur ne peut prévoir le comportement ou l'évolution d'un tel système par un raccourci de calcul. On a alors recours à la modélisation qui consiste à établir un certain nombre de règles d'évolution, puis à simuler l'évolution de ce système en itérant ces règles. Un système est dit complexe si le résultat final n'est pas prédictible directement, même en connaissant les règles et les conditions initiales.

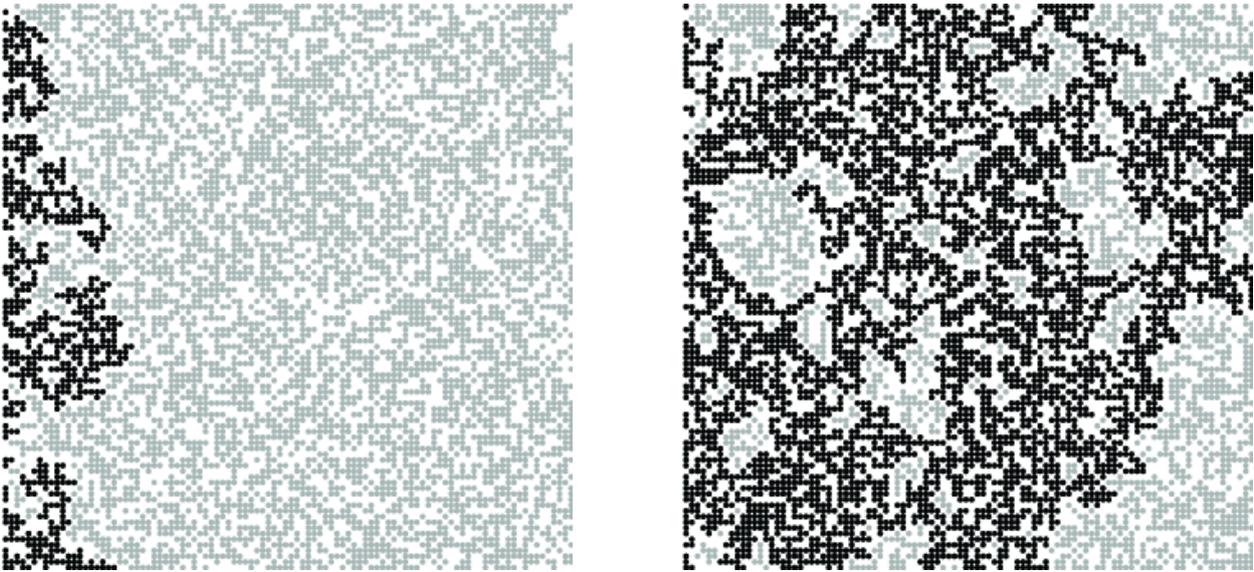


Figure 3: Propagation d'un incendie par un modèle de percolation sur un domaine de 100×100 sites : (à gauche) dopage de 58%, (à droite) dopage de 59%.

Pour un dopage de 58%, la probabilité que le feu se propage d'un bout à l'autre du domaine est très faible. En augmentant le dopage de 1%, il y a percolation, c'est-à-dire que la probabilité que le feu se propage jusqu'au bord opposé est très grande.

Pour ce domaine de 100×100 sites, 104 simulations ont été réalisées. On observe sur le diagramme (a) de la Figure 4, qui représente l'évolution du rapport du nombre de sites brûlés au nombre total de sites actifs en fonction du dopage, une transition marquée au voisinage de $p = 0,6$. Nous ne le montrons pas ici, mais la transition est d'autant plus brutale que l'on augmente la taille du domaine, et survient à une valeur bien précise pour un domaine infini. La valeur du dopage à laquelle survient cette transition est appelé *seuil de percolation*.

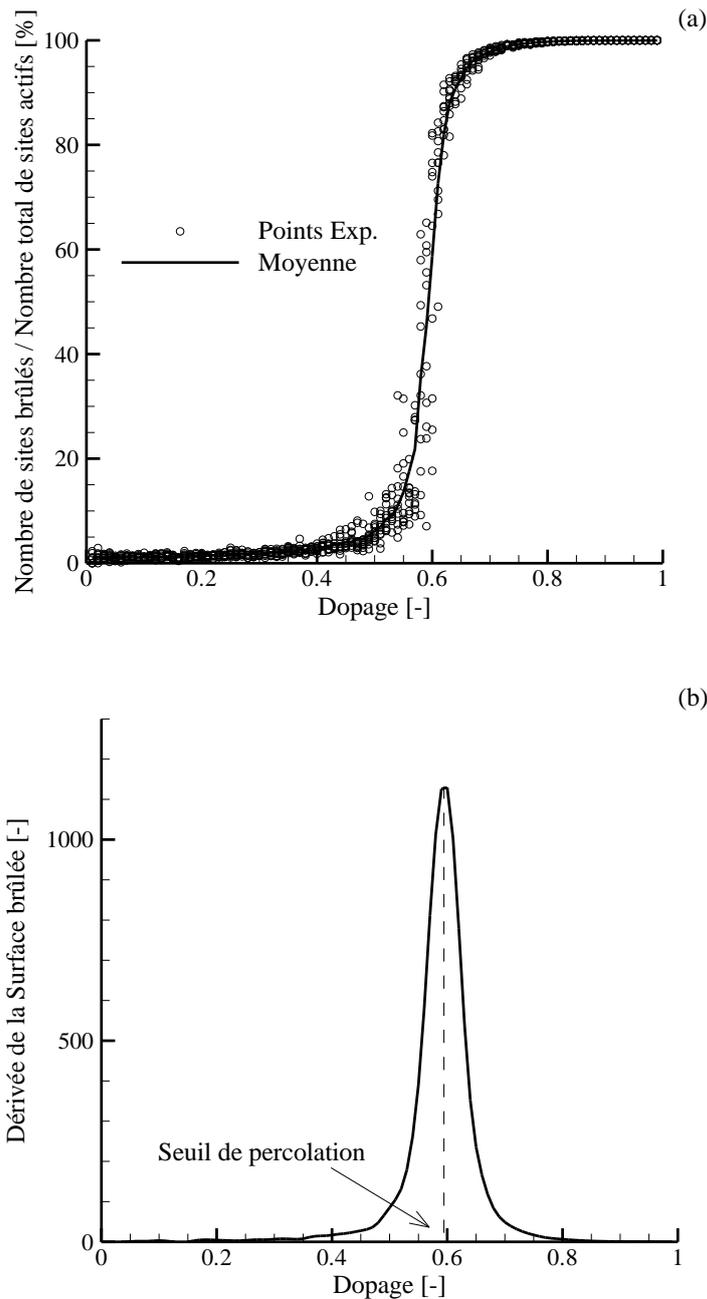


Figure 4 : (a) Rapport du nombre de sites brûlés au nombre total de sites actifs en fonction du dopage, (b) sa dérivée en fonction du dopage. Le domaine comprend 100×100 sites.

Si l'on trace la dérivée de la fonction (Figure 4b), on obtient généralement un maximum, dont l'abscisse est, aux erreurs statistiques près, la valeur du seuil de percolation. Cette étude statistique permet d'estimer cette valeur à 0,5943, en très bon accord avec la valeur théorique de 0,593 (Clerc, 2003). Une méthode plus fiable, nous y reviendrons, consiste à tracer le temps statistique moyen de parcours en fonction de la densité, le seuil de percolation correspondant au maximum de la fonction.

Remarque : La valeur du seuil de percolation dépend de la coordinnence (i.e. le nombre moyen de proches voisins d'un élément), noté z . Comme nous l'avons déjà évoqué, pour un voisinage de von Neuman, où $z = 4$, la valeur du seuil de percolation est de 0,5943, alors que, dans le cas du voisinage de Moore, où $z = 8$, la valeur du seuil passe à 0,407.

D'un point de vue théorique, le seuil de percolation correspond à l'apparition au sein du système d'un amas de taille infinie, la dérivée seconde s'annulant au point critique. Zekri et al. (2005) ont montré que la transition propagation/non-propagation d'un feu de forêt est une transition de phase du second ordre, dans la mesure où certaines grandeurs (surface brûlée, taille du plus gros amas, nombre d'amas, etc.) obéissent à des lois de puissance dont les exposants sont universels. Ils sont universels car ils ne dépendent pas de la symétrie du réseau, que ce dernier soit carré, triangulaire ou hexagonal. Le comportement de la surface brûlée au voisinage du seuil se comporte ainsi comme: $S_b \propto (p - p_c)^\beta$.

1.3.2.2 Automates cellulaires

Utilisant également la notion de pondération temporelle de site, un automate cellulaire se distingue d'un modèle de percolation par sa loi de contamination et donc indirectement par sa définition du voisinage. Ainsi, l'état d'une cellule au temps $t+\Delta t$ est fonction de l'état au temps t d'un nombre fini de cellules voisines. Cette amélioration va dans le bon sens puisque la loi de contamination tente de prendre en compte les effets collectifs au travers de configurations caractéristiques. Ainsi, cette approche a été appliquée avec succès à la mécanique des milieux avec transferts thermiques et/ou réactions chimiques et aux systèmes de réaction-diffusion (Margerit et Séro-Guillaume, 1997 ; Margerit, 1998 ; Hoekstra et al., 2010).

La première utilisation des automates cellulaires pour modéliser la propagation des feux de forêt est attribuée à Kourtz et O'Regan (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 sa difficulté à modéliser les mécanismes physiques fondamentaux qui régissent la propagation du feu. En effet, ils utilisent des coefficients de pondération empiriques et, par conséquent, leur domaine de validité se limite aux conditions pour lesquelles ces coefficients ont été établis.

1.3.2.3 Modèles de réseau de petit monde

Comme le soulignait Pierre-Gilles de Gennes (1976) dès 1976, l'utilisation de réseaux réguliers, où les connexions sont limitées aux plus proches voisins, ne permet pas d'inclure les effets à longue distance comme le rayonnement de la flamme ou les projections de brandons qui sont à l'origine des sautes de feu. La conséquence est que ces modèles de réseau régulier ne permettent pas de retrouver les propriétés de propagation, en particulier la super-diffusion⁴, et encore moins les propriétés fractales, des feux qui rencontrent des hétérogénéités lors de leur propagation, comme celui représenté sur la Figure 2.

A la fin des années 90, s'inspirant des travaux sur les réseaux sociaux de Stanley Milgram, psychologue social à l'Université d'Harvard, Watts et Strogatz, de l'Université de Cornell, ont proposé un modèle de réseau appelé réseau de "petit monde" (Watts et Strogatz, 1998). Il permet, en plus de la création d'amas, des connexions à longue distance en un nombre fini d'étapes. Le réseau de petit monde est construit à partir d'un réseau régulier, de dopage p , auquel aux connexions entre plus proches voisins s'ajoutent, pour chaque site actif, des connexions à longue distance, appelées courts-circuits (les brandons, par exemple). La *Figure 5* illustre le modèle original de petit monde original de Watts et Strogatz.

Ce modèle a été appliqué avec succès à un très grand nombre de domaines divers et variés, depuis l'épidémiologie jusqu'à la propagation des rumeurs ou des virus sur internet, en passant par la physique et la biochimie.

⁴ Les fluctuations statistiques de la distance parcourue par le front varient comme t^α . La propagation est dite super-diffusive pour $\alpha \geq 1/2$ (ballistique si $\alpha=1$). La super-diffusion est due aux connexions à longue portée.

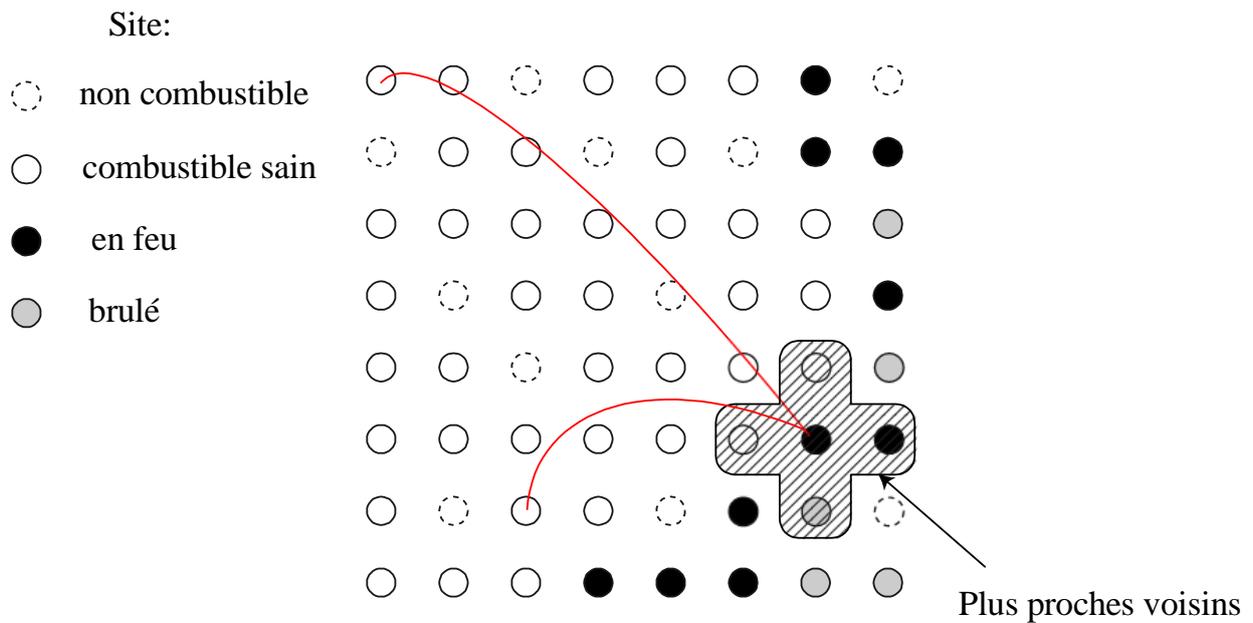


Figure 5: Modèle original de réseau de petit monde de Watts et Strogatz (1998). On distingue les connexions limitées aux plus proches voisins et celles à longue distance (ou courts-circuits) représentées par une courbe rouge.

L'extension aux feux de forêts du modèle de petit monde est le fruit d'une collaboration très active entre l'IUSTI et l'Université d'Oran qui remonte à 2004. Elle a consisté d'une part, à remplacer le voisinage de von Neumann d'un site en feu par un domaine d'interaction du rayonnement de forme elliptique dont les dimensions dépendent empiriquement du vent moyen et de la topographie du terrain et, d'autre part, à introduire la physique du feu au travers des temps caractéristiques de dégradation thermique et de combustion du végétal (Zekri et al., 2005 ; Porterie et al., 2005). Dans la référence (Zekri et al., 2005), les auteurs ont calculé les exposants critiques au voisinage du seuil de percolation et montré leur universalité. Ce modèle a permis également d'étudier l'efficacité des coupures de combustible (Kaiss et al., 2007) et le rôle des sautes de feu sur la dynamique de propagation (Porterie et al., 2007).

Les travaux de thèse de Y. Billaud (2011) reposaient sur une approche couplant un modèle de flamme solide et la méthode de Monte-Carlo pour le calcul du rayonnement thermique émis par un site en feu. Cela permettait de s'affranchir de l'empirisme attaché au domaine d'interaction évoqué précédemment. Nous avons supposé que l'inflammation se produit lorsque l'énergie reçue par un site atteint une valeur critique, définie comme l'énergie nécessaire pour chauffer l'eau contenue

dans le végétal jusqu'à la température d'ébullition de l'eau, vaporiser cette eau, et chauffer le matériau végétal sec jusqu'à la température de pyrolyse.

Cette version du modèle de petit monde ne permettait donc pas de prendre en compte le préchauffage convectif du site réceptif par les gaz chauds et son refroidissement radiatif. Cela exclut les configurations où la flamme est couchée dans la strate végétale sous l'action conjuguée d'un vent fort et d'une pente ascendante importante. Albini et Brown (1996) définissent très précisément les limites d'un modèle de propagation purement radiatif⁵. Cette version du modèle n'était donc pas non plus destinée à prédire les transitions feux de broussailles/feux de cimes, l'effet canyon ou les embrasements généralisés éclairs, des situations où les modes convectif et radiatif jouent un rôle non négligeable. C'est le cas notamment de la configuration en talweg (effet canyon) où le feu, qui se propage sur un versant descendant, préchauffe les sites situés sur le versant ascendant opposé. Ces derniers ne peuvent en effet accumuler de l'énergie sans en perdre par rayonnement au risque de produire un embrasement précoce du versant opposé (Y. Billaud, 2011).

Appliqué à des brûlages dirigés en savane sub-saharienne et à un feu historique (Lançon de Provence, 2005) pour lesquels le rayonnement est le seul mécanisme de propagation, le modèle a montré qu'il était capable de restituer les contours de feux réels et de retrouver ses propriétés fractales (Adou et al., 2010).

1.4 Objectifs et plan du mémoire

La procédure consiste à construire un réseau amorphe de sites représentatif du couvert végétal et à décrire le plus finement possible les phénomènes qui se produisent à l'échelle macroscopique, notamment ceux négligés jusqu'alors, à savoir le préchauffage convectif par les gaz chauds de la strate végétale réceptive et son refroidissement radiatif. Sur ce dernier point, nous verrons que cela repose sur la résolution d'une équation instationnaire de l'énergie incluant l'ensemble des processus thermiques. La présentation du modèle de propagation fait l'objet du chapitre 2.

⁵ Il est couramment admis que, lorsque la flamme se trouve au-dessus du lit, le mode de transfert de chaleur prépondérant est le transfert radiatif : « Radiation is often the dominant mechanism for wildland fire spread for the simple reason that the air flow is directed toward the burning zone rather than away from it, at least in the near vicinity of the fire edge where rapid heating of unignited fuel is taking place. This situation holds even for wind-aided fire spread whenever the flame structure stands erect above the fuel surface rather than being blown through it. » (Albini et Brown, 1996).

Le modèle est ensuite validé sur différents scénarios de feux, en termes de surface brûlée, de vitesse de propagation, de contours de feu et de surface brûlée. Le chapitre 3 est enfin consacré à une étude de sensibilité destinée à identifier les paramètres influents du modèle et à les hiérarchiser, mais aussi à proposer des pistes pour une évaluation globale du risque incendie.

2 PRESENTATION DU MODELE DE PROPAGATION

2.1 Construction du réseau

La première étape du modèle consiste à construire un réseau bidimensionnel dont les nœuds sont occupés par les éléments de végétation (i.e. arbres, arbustes, buissons, etc.). On supposera que le couvert végétal est composé de sites cylindriques dont le projeté est un disque et que, de plus, ces sites ne se chevauchent pas.

Il est important de caractériser un réseau par sa capacité à représenter le plus fidèlement possible la densité de végétation et, le cas échéant, sa polydispersité (distribution en taille), mais aussi par ses propriétés d'amorphisme (répartition spatiale aléatoire des sites ou variété des distances entre deux sites voisins) et d'homogénéité. En effet, la densité et la polydispersité d'un couvert végétal sont des paramètres déterministes qu'il est possible d'estimer *a priori*, grâce à des images aériennes ou satellitaires, et donc qu'il est nécessaire de maîtriser lors de la construction du réseau. En revanche, les sites se répartissent le plus souvent de façon aléatoire et, à une échelle grande devant la taille moyenne des végétaux (par exemple, à une échelle de 10 fois le diamètre moyen), le paysage révèle une certaine homogénéité spatiale (on peut estimer cette homogénéité en déterminant le degré d'amorphisme et la polydispersité à cette échelle).

Après avoir défini préalablement une propriété essentielle du réseau, à savoir son degré d'amorphisme, quatre méthodes de génération de réseaux seront ensuite présentées et évaluées. La première méthode s'appuie sur une structure sous-jacente régulière carrée, la seconde sur la génération aléatoire « à la volée », la troisième sur la minimisation de fonctionnelle et la dernière sur l'algorithme génétique (AG). Nous montrerons enfin comment intégrer le réseau au paysage, au travers du modèle numérique de terrain.

2.1.1 Degré d'amorphisme

On se propose ici d'évaluer la qualité d'un réseau par son degré d'amorphisme. Un degré d'amorphisme nul correspond à l'ordre parfait, c'est à dire à une disposition où les sites (à l'exception de ceux situés près des frontières du domaine) occupent les nœuds d'un réseau hexagonal parfait. Dans ce cas, les distances entre deux sites voisins quelconques sont égales. A l'opposé, un degré d'amorphisme élevé correspond à une grande variété de distances entre deux voisins quelconques.

Pour déterminer le degré d'amorphisme d'un réseau, il faut tout d'abord répartir les distances entre deux sites voisins sur un certain nombre de classes. Le degré d'amorphisme du réseau peut alors être évalué par son entropie S définie comme suit :

$$S = - \sum_{i=1}^{N_{classes}} f_i \log_2 \frac{1}{f_i} \quad (2)$$

où i représente une classe de distance, $N_{classes}$ le nombre de classes et f_i le rapport du nombre de paires de sites de classe i sur le nombre total de paires.

Dans le cas d'une structure hexagonale ($N_{classes} = 1, f_1 = 1$), on a bien : $S \rightarrow 0$.

La configuration est d'autant plus amorphe que la variété des distances est grande, ce qui se traduit par une augmentation de l'entropie.

La *Figure 6* montre un réseau amorphe monodisperse de dopage 0.56 généré aléatoirement « à la volée » et l'histogramme des distances entre deux sites voisins qui lui est associé. Le nombre de classes de distances a été fixé à 19. Dans ce cas, l'entropie du réseau est de 3.96, ce qui traduit un degré d'amorphisme élevé.

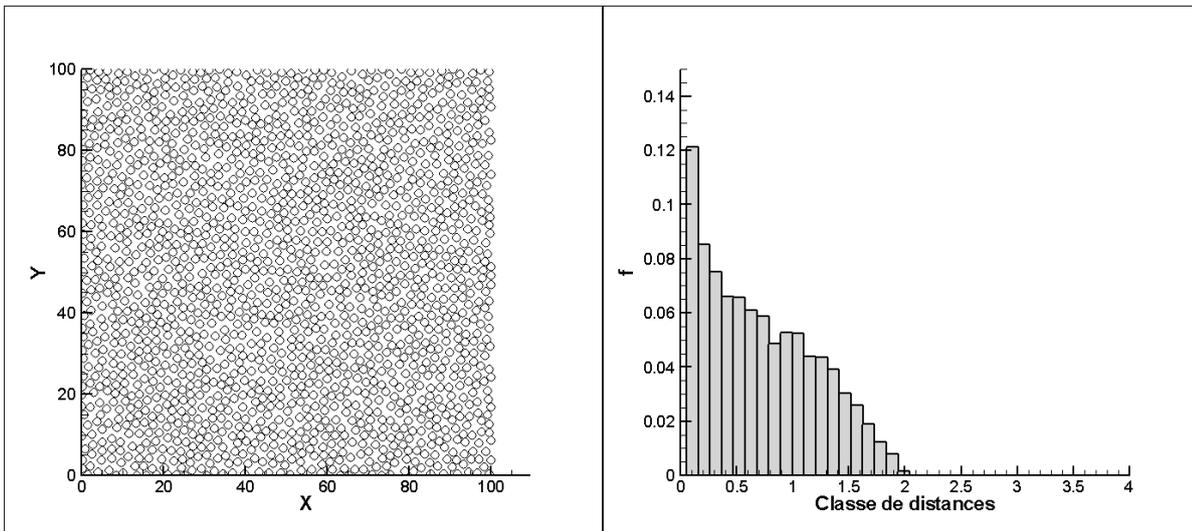


Figure 6. Réseau amorphe et histogramme des classes de distances (en m) entre deux sites voisins.
Le rayon des sites est de 1m et le dopage est de 0.56.

2.1.2 Méthodes de génération du réseau

Pour chacune des méthodes présentées, nous précisons leurs avantages et inconvénients, de façon à justifier leur utilisation pour un couvert végétal donné.

Réseau monodisperse s'appuyant sur une structure sous-jacente régulière

Lorsque l'on veut représenter un couvert végétal homogène, le réseau qui vient aussitôt à l'esprit est le réseau monodisperse qui s'appuie sur une structure sous-jacente carrée (Figure 7a). Les sites, en forme de disque, occupent les nœuds d'une grille dont la maille est égale au diamètre du site. Si tous les nœuds de la grille sont occupés, le dopage est égal à 1, mais il correspond à un taux de remplissage maximal, défini comme la proportion de la surface totale occupée par les sites, de $\pi/4 = 0.785$. Le réseau peut également s'appuyer sur une structure triangulaire (ou hexagonale) (Figure 7b). Dans ce cas, le taux de remplissage maximal est de $\pi/2\sqrt{3} = 0.907$.

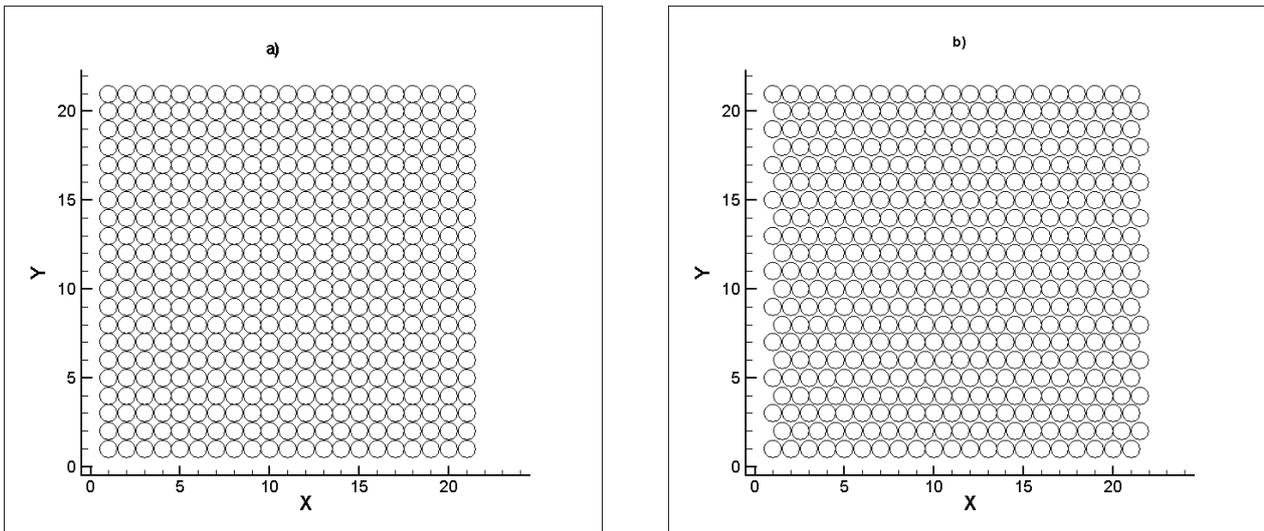


Figure 7 : Réseaux réguliers s'appuyant sur des structures sous-jacentes (a) carrée et (b) triangulaire (ou hexagonale).

Bien qu'il soit assez éloigné de la réalité (forêt de théoricien, disent certains !), ce type de réseau régulier est couramment utilisé car sa construction est facile à mettre en œuvre et nécessite peu de ressources informatiques (CPU, capacité mémoire). Un autre avantage est de pouvoir repérer facilement les sites voisins à un site donné puisque les numéros des sites se suivent. Il est bien sûr possible de réduire le taux de remplissage en supprimant de façon aléatoire, mais uniforme, certains sites du réseau dopé à 100%. Si l'on obtient alors une bonne homogénéité, le degré d'amorphisme est en revanche très faible, dans la mesure où la variété des distances entre deux voisins l'est aussi. A cela s'ajoute, dans le cas polydisperse, la difficulté de maîtriser conjointement densité et polydispersité végétales, ce qui limite l'utilisation de ce type de réseau au cas monodisperse.

Génération aléatoire « à la volée »

Le réseau peut être construit en plaçant les sites de façon aléatoire, tout en respectant la condition de non-chevauchement des sites. Il suffit d'utiliser un générateur de nombres aléatoires. Cette procédure se révèle performante pour des taux de remplissage faibles à modérés, typiquement inférieurs à 56% en configuration monodisperse. Au-delà, elle se montre vite inadaptée. En configuration polydisperse, ce seuil peut être dépassé (Figure 8), mais il est alors difficile de contrôler la distribution en taille de sites imposée *a priori*.

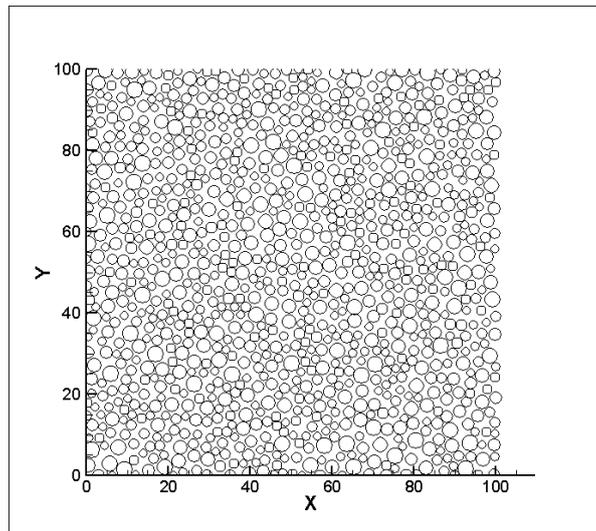


Figure 8 : Réseau amorphe polydisperse de dopage 0.6.

Génération par minimisation de fonctionnelle

Une autre alternative consiste à utiliser une méthode de construction de réseau reposant sur une minimisation de fonctionnelle. Cette méthode est dite « dynamique », dans le sens où la position et la taille de chaque site évoluent au cours du processus de remplissage du réseau.

Elle consiste tout d'abord à générer un premier réseau en s'appuyant sur un maillage triangulaire non-structuré de Delaunay (*Figure 9*), où chacun des sites en forme de disque est inscrit dans un triangle du maillage. On obtient l'assemblée initiale des particules. Cette assemblée, pour laquelle les particules ne sont pas en contact, présente une porosité assez élevée. A noter qu'il suffit de raffiner le maillage triangulaire de Delaunay pour obtenir un nombre de sites plus important.

On s'intéresse en premier lieu aux sites (i) situés à l'intérieur du domaine, et pour chacun d'eux, on définit une fonction de distance avec ses plus proches voisins (j) :

$$e_{ij} = \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|^2 - (r_i + r_j)^2 \quad (3)$$

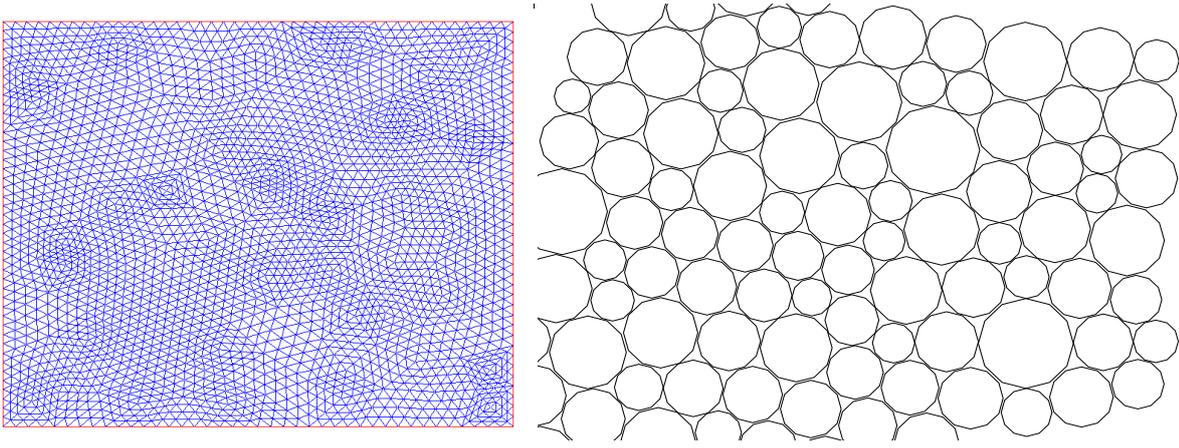


Figure 9 : Maillage triangulaire non structuré de Delaunay et zoom sur une partie du réseau obtenu par minimisation de fonctionnelle.

où \vec{x}_i est le vecteur des coordonnées du centre de la particule (i) et r_i son rayon.

Si la particule (i) possède n_i voisins, la somme des distances est égale à:

$$E_i = \sum_{j=1}^{n_i} e_{ij} = \sum_{j=1}^{n_i} \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|^2 - (r_i + r_j)^2 \quad (4)$$

Réduire les espaces interstitiels entre sites consiste alors à minimiser la fonction suivante:

$$F = E^T E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \delta_{ij} e_{ij}^2 \quad (5)$$

où δ_{ij} est la fonction delta qui prend la valeur 1 si le contact entre la paire $[i, j]$ existe, la valeur 0 dans le cas contraire.

Pour résoudre ce problème de minimisation et obtenir ainsi les valeurs finales du rayon et de la position des centres de chaque site, un schéma de Levenberg-Marquardt est utilisé (Levenberg, 1944 ; Marquardt, 1963). A noter que la méthode des moindres carrés ne peut être utilisée en raison de la contrainte sur le rayon qui s'ajuste en cours de procédure.

Si cette méthode permet d'obtenir une bonne adéquation densité/polydispersité et une homogénéité satisfaisante, le degré d'amorphisme du réseau est faible et le temps de calcul est important.

Génération par algorithme génétique (AG)

L'algorithme génétique appartient également à la famille des méthodes « dynamiques ». Il s'inspire des mécanismes régissant l'évolution des espèces dans leur environnement naturel : les individus d'une espèce se reproduisent, créent des nouveaux individus, certains subissent des modifications génétiques, certains disparaissent. Il repose sur le principe que les individus les mieux adaptés à leur environnement ont une plus grande facilité à se reproduire et que la reproduction assure le croisement des gènes les plus performants dans la population. Ces algorithmes permettent de résoudre des problèmes fortement non linéaires et discontinus, et trouvent des applications dans des domaines divers et variés, comme la robotique, la finance, ou la chimie. Une description complète des bases sur lesquelles reposent les algorithmes génétiques et de leur large domaine d'applications sont présentés dans des ouvrages de référence (Gen et Cheng, 1997 ; Back et al., 1997 ; Goldberg, 1989). On citera par exemple les applications concernant la résolution de problèmes de conduction inverse (Raudensky et al., 1995) ou la détermination de propriétés thermo-physiques de matériaux solides combustibles exposés au feu (Lautenberger et al., 2006).

L'algorithme génétique se déroule suivant une séquence schématisée sur la *Figure 10*. Le premier site du réseau est placé au centre d'un domaine fictif, plus grand que le domaine réel. Le placement des sites se fait du centre vers les frontières du domaine. Le calcul s'arrête lorsque le domaine réel, est rempli.

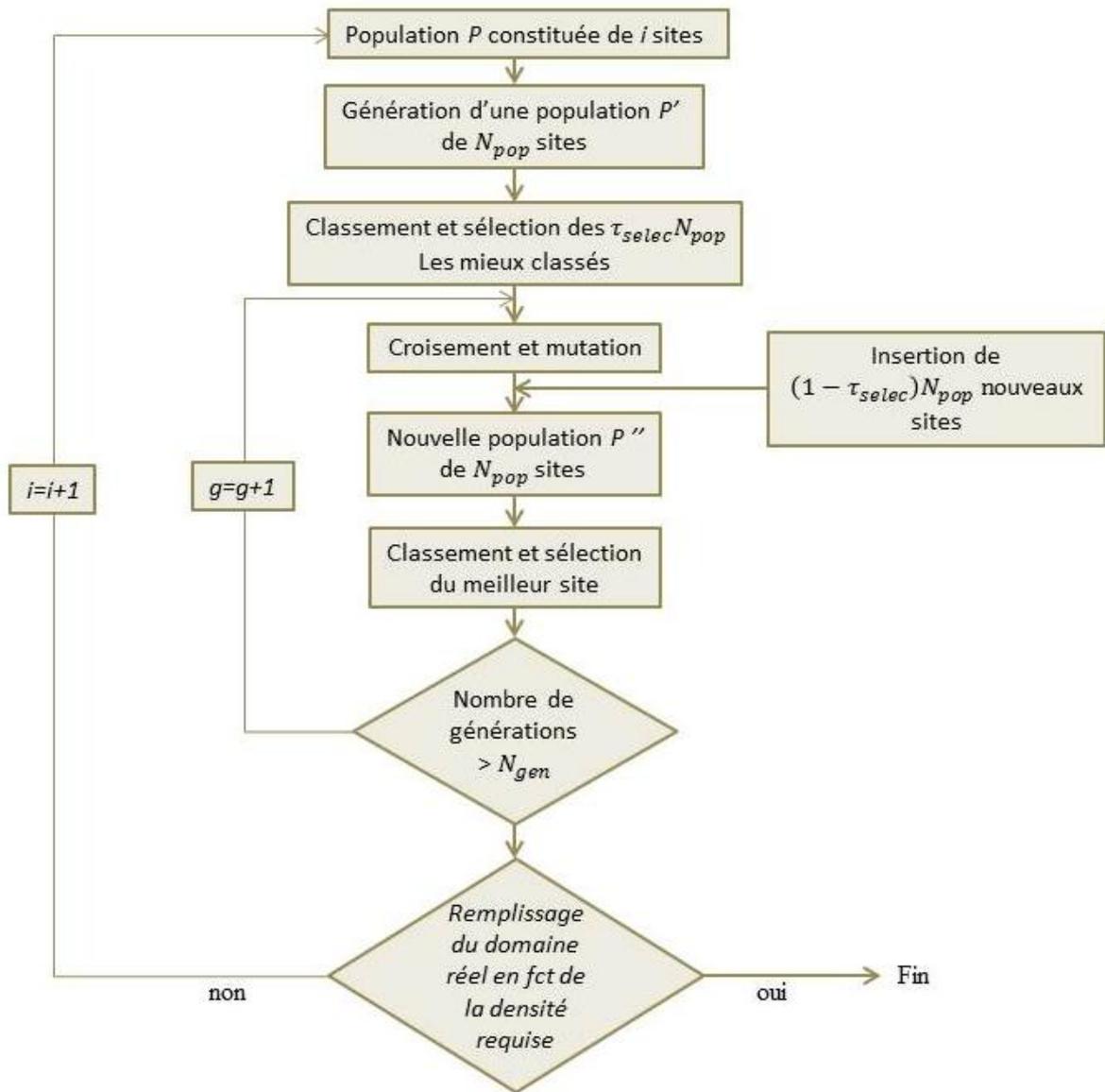


Figure 10 : Organigramme décrivant les étapes de l'algorithme génétique.

Détaillons les étapes de cette séquence pour laquelle la population P est déjà constituée de i sites.

1. Génération aléatoire d'une population P' de N_{pop} sites parmi lesquels nous allons extraire le meilleur individu à l'issue de N_{gen} générations.
2. Classement des individus en fonction de leur adaptation. Dans le cas présent, On conserve, pour la reproduction, les $\tau_{selec}N_{pop}$ les mieux classés, c'est-à-dire les plus proches des sites de la population P .
3. Création de nouveaux individus par croisement des parents et mutation des enfants obtenus. Les croisements permettant de simuler des reproductions d'individus dans le but d'en créer

de nouveaux, la mutation consiste ici à rapprocher les enfants des sites i les plus proches, en respectant la distribution en taille et l'amorphisme.

4. Insertion de nouveaux individus dans la population afin de maintenir la diversité génétique. La population P'' est maintenant constituée de $\tau_{selec}N_{sites}$ individus issus de la population, après croisement et mutation, et de $(1 - \tau_{selec})N_{sites}$ nouveaux individus.
5. Nouveau classement des individus et sélection du meilleur individu.
6. Retour à l'étape 3 jusqu'à obtention d'une solution, supposée optimale après N_{gen} générations.

Cette séquence est répétée jusqu'à remplir le domaine réel, compte tenu de la densité voulue.

La *Figure 11* donne un exemple de réseau amorphe monodisperse généré grâce à l'algorithme génétique.

L'AG permet d'obtenir le meilleur compromis entre l'adéquation densité/polydispersité, le degré d'amorphisme et l'homogénéité. Cela se fait cependant au détriment du temps de calcul.

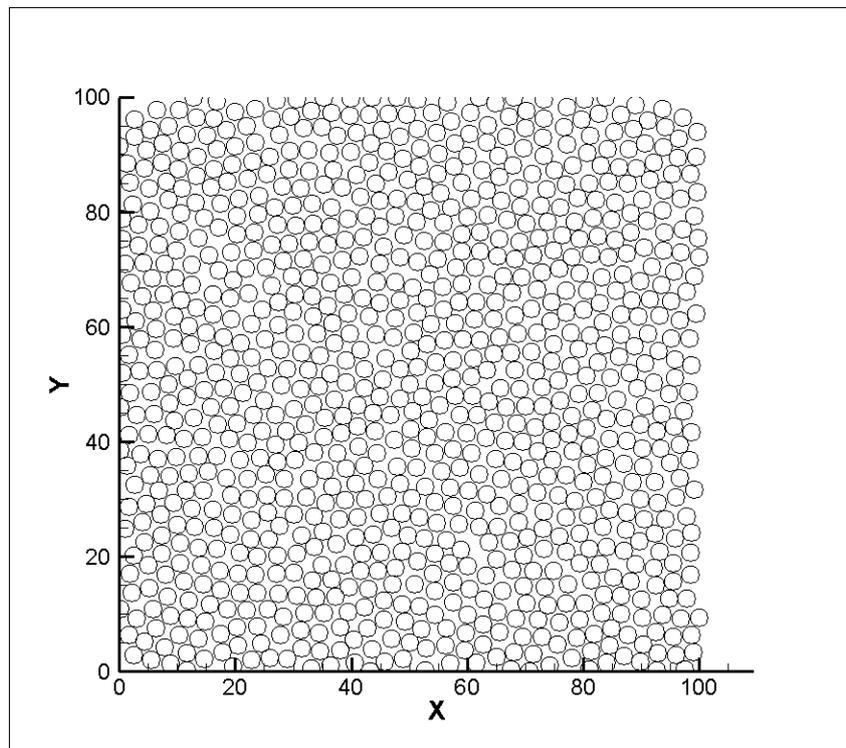


Figure 11. Exemple de réseau amorphe monodisperse de dopage 0.7 généré à l'aide de l'AG. Le domaine est de $100m \times 100m$ et le rayon d'un site est de $1m$. Les paramètres de l'AG sont : une population de 50 individus, un taux de sélection de 75%, un taux de mutation de 35% et un nombre de générations de 10.

2.1.3 Intégration du réseau au modèle numérique du terrain (MNT)

Un modèle numérique de terrain est un modèle de représentation d'altitude sous la forme d'un fichier écrit sous forme matricielle (par opposition à une structure vecteur, donnant les courbes de niveau). La matrice contient des données géo-référencées XYZ, donnant l'altitude Z pour chaque nœud régulier en X et Y.

Les MNT sont produits en utilisant des relevés topographiques, par méthode traditionnelle ou GPS, des photographies aériennes, un lidar aéroporté, ou des images satellites. La taille de la zone à représenter et la précision requise déterminera le meilleur procédé. Pour des applications dédiées aux feux de forêts, on utilise le plus souvent des MNT, issus d'ortho photos⁶, dont la résolution peut aller jusqu'à 1m.

L'intégration du réseau au MNT consiste tout d'abord à trianguler le MNT en divisant chaque pavé carré en deux triangles. Le réseau amorphe est ensuite généré aléatoirement sur le projeté XY du terrain avec la concentration souhaitée, en associant à chaque site le triangle auquel il appartient.

Pour déterminer son altitude, prenons, comme exemple, le site situé au point D' de la *Figure 12*. Connaissant les coordonnées géo-référencées des sommets du triangle, A', B' et C', et donc celles du vecteur normal à ce triangle, \vec{n} , l'altitude du site est obtenue simplement en résolvant l'équation $\overrightarrow{A'D'} \cdot \vec{n} = 0$.

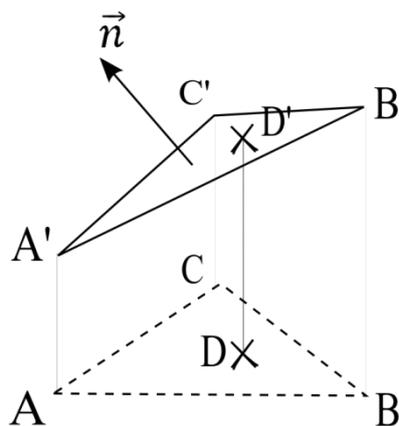


Figure 12. Schéma illustrant le calcul de l'altitude d'un site du réseau amorphe.

⁶ Les ortho photos sont des photos aériennes dont les déformations dues à la projection centrale, au relief et à la parallaxe, ont été corrigées.

La Figure 13 montre la cartographie 2D et l’histogramme des pentes relatifs au paysage de Lançon de Provence sur lequel un feu s’est propagé en juillet 2005.

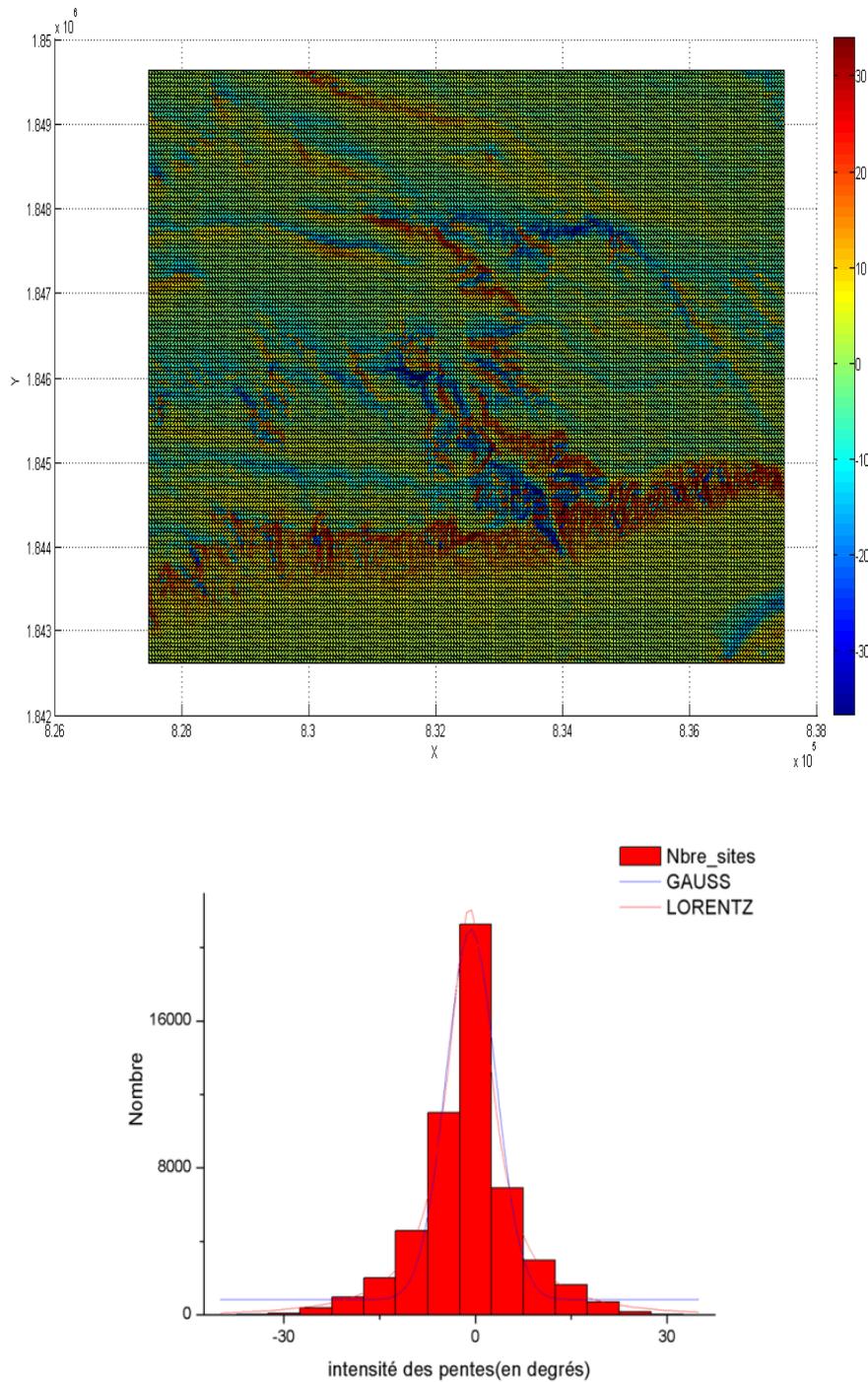


Figure 13 .Cartographie topographique et histogramme des pentes de la zone de Lançon de Provence. La courbe Lorentzienne semble mieux décrire cette distribution de pentes que la courbe gaussienne.

La cartographie permet de localiser les zones présentant de fortes pentes, ascendantes ou descendantes. L'histogramme des pentes nous apporte des informations sur la distribution des pentes sur la zone. Sur l'exemple de Lançon de Provence, il révèle des pentes n'excédant pas 30 degrés, avec une forte proportion de pentes inférieures à 10 degrés.

2.2 Modèle macroscopique de combustion

La propagation des feux est un phénomène multi physique multi échelle. A l'échelle gigascopique, le front du feu est vu comme une ligne, séparant le combustible brûlé du combustible vierge, se déplaçant sur un relief, mais le moteur de la propagation se trouve à une échelle inférieure dite « macroscopique ». C'est à l'échelle macroscopique que se produisent les transferts thermiques, la dégradation et la combustion du végétal, et les réactions en phase gazeuse. C'est aussi à cette échelle que les hétérogénéités locales, liées aux conditions météorologiques, topographiques et de végétation, interagissent avec le front de flammes.

Comme nous l'avons mentionné en introduction, le modèle macroscopique repose sur un bilan instationnaire d'énergie du végétal, incluant le préchauffage radiatif de la strate végétale réceptive provenant du front de flammes, mais aussi son préchauffage convectif et son refroidissement radiatif. Le préchauffage radiatif utilise une approche couplant un modèle de flamme solide et la méthode de Monte-Carlo (Y. Billaud, 2011). L'inflammation se produit lorsque l'énergie reçue par un site atteint une valeur critique, définie comme l'énergie nécessaire pour chauffer l'eau contenue dans le végétal jusqu'à la température de vaporisation, vaporiser cette eau, et chauffer le matériau végétal sec jusqu'à la température de pyrolyse.

2.2.1 Bilan d'énergie sur un site récepteur donné

Le point de départ de notre modèle est l'approche développée par Koo et al. (2005) pour un milieu poreux uniforme thermiquement fin. Cette approche unidimensionnelle stationnaire reposait sur la conservation de l'énergie d'un volume élémentaire de combustible exposé au feu. La conduction était négligée, mais les transferts de chaleur convectif et radiatif à l'intérieur et à l'extérieur de la strate végétale étaient pris en compte. Le rayonnement de la flamme est calculé en assimilant celle-

ci à un panneau radiant noir ou gris et en utilisant un simple facteur de forme entre la flamme et la végétation réceptrice. Le critère d'allumage reposait sur une température critique.

Si nous nous sommes inspirés de cette approche, celle-ci a été considérablement revisitée, en particulier au niveau du rayonnement émis par la flamme, traité maintenant en couplant un modèle de flamme solide à la méthode de Monte-Carlo, et en adoptant un processus de dégradation thermique du végétal plus élaboré. Nous avons également pris en compte le phénomène d'écrantage par un site intercalé entre le site en feu et le site exposé.

Dans notre modèle, chaque site est assimilé à un cylindre dont le diamètre et la hauteur sont ceux du site végétal (*Figure 14*). L'aire de la face supérieure du site est alors : $S_{site} = \pi D^2/4$.

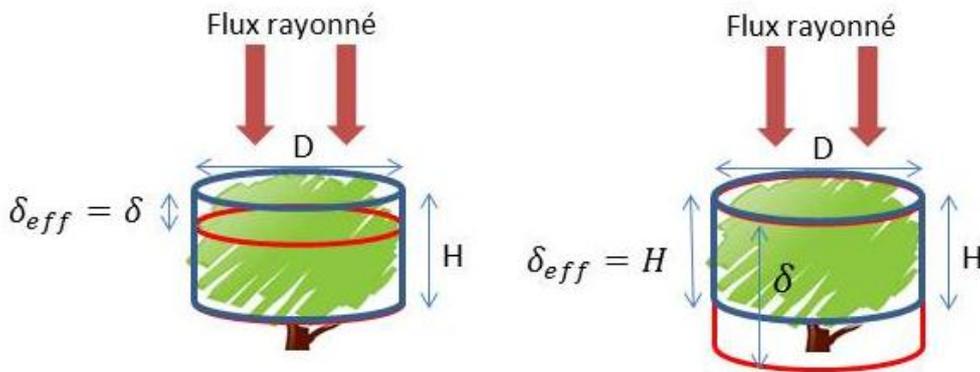


Figure 14 : Le site végétal est assimilé à un cylindre de hauteur H et de diamètre D . δ_{eff} est la longueur effective de pénétration du rayonnement dans la strate végétale.

Le volume sur lequel le bilan d'énergie est établi n'est pas le volume du site tout entier mais plutôt le volume impliqué par le rayonnement. La grandeur qui caractérise ce volume impliqué est la profondeur de pénétration du rayonnement, δ (en m). Elle est directement reliée au rapport surface/volume des éléments de végétation, $\sigma_k = S_k/V_k$, et à la fraction volumique de la phase solide k , $\alpha_k = V_k/V$, par la relation (De Mestre *et al.*, 1989 ; Butler, 1993):

$$\delta = \frac{4}{\sigma_k \alpha_k}$$

(6)

La longueur de pénétration du rayonnement est l'inverse du coefficient d'absorption, κ_{fb} , ce qui implique :

$$\kappa_{fb}\delta = 1 \quad (7)$$

Au-delà de δ , le rayonnement est supposé ne pas interagir avec les éléments de végétation (De Mestre *et al.* 1989).

Bien évidemment, δ ne peut excéder la hauteur H de la strate végétale. Il est donc commode de définir la profondeur effective de pénétration :

$$\delta_{eff} = \min(H, \delta) \quad (8)$$

2.2.1.1 Conservation de l'énergie d'un site exposé au feu

Le problème physique est représenté sur la *Figure 15*.

La conservation de l'énergie pour un site exposé à un site en feu conduit à l'équation suivante :

$$P'''_{sensible} + P'''_{latente} = P'''_{rad,fl} + P'''_{rad,fuel} + P'''_{conv} - P'''_{rad,pertes} \quad (9)$$

Le terme de gauche est la somme de la puissance absorbée et utilisée pour monter la température du végétal, $P'''_{sensible}$, vaporiser l'eau ou libérer les produits de pyrolyse contenue dans le végétal, $P'''_{latente}$.

Le terme de droite représente la somme des contributions de chacun des mécanismes pris en compte : $P'''_{rad,fl}$, $P'''_{rad,fuel}$, $P'''_{rad,pertes}$ correspondent respectivement au rayonnement de la

flamme, au rayonnement des braises à l'intérieur de la strate végétale, aux pertes radiatives, et P'''_{conv} au préchauffage convectif du site situé dans le sillage des gaz chauds émis par le site en feu. La conduction du gaz et la convection à l'intérieur de la strate végétale sont négligées.

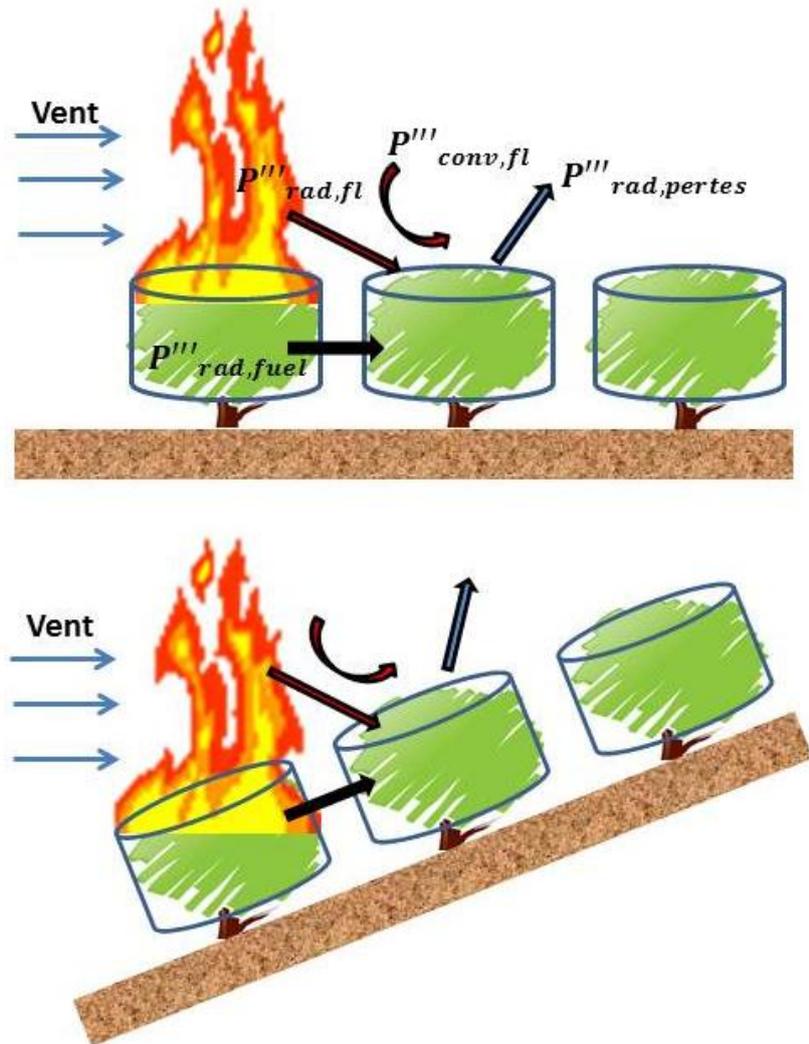


Figure 15 : Les différentes contributions énergétiques d'un site exposé au feu en présence de vent et sur un terrain plat ou en pente.

Exposé au feu, le site récepteur est supposé évoluer en quatre phases distinctes :

- une phase d'élévation de sa température.
- une phase de dessiccation, changement de phase qui transforme le combustible fin humide (WFF) en combustible fin sec (DFF). La phase de dessiccation est supposée se produire lorsque la température du végétal atteint la température de vaporisation de l'eau, soit 373K.

- une phase de montée en température du végétal sec jusqu'à sa température de pyrolyse.
- une phase de pyrolyse, changement de phase qui est supposé se produire lorsque la température du végétal atteint la température de pyrolyse. Au cours de cette phase, si la quantité de produits de pyrolyse est suffisante, l'inflammation pilotée se produit.

On suppose en outre que :

- 1) la fraction volumique et le rapport surface/volume des éléments fins de végétation ne sont pas modifiés pendant le processus de dégradation, ce qui conduit à l'égalité des fractions volumiques et des rapports surface/volume des éléments fins humides (WFF) et secs (DFF) :

$$\alpha_{WFF} = \alpha_{DFF} = \alpha \text{ et } \sigma_{WFF} = \sigma_{DFF}$$

- 2) l'absorptivité des éléments fins humides, a_{WFF} , est la même que celle des éléments fins secs :

$$a_{WFF} = a_{DFF} = a$$

- 3) la strate est homogène et composée d'éléments fins ayant les mêmes propriétés géométriques et thermo-physiques.

Les équations qui en résultent sont données ci-dessous.

1ère phase: Si $T < T_{vap}$:

$$\rho_{WFF} c_{p_{WFF}} \alpha \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^{N_f(t)} [P'''_{rad,fl}(i) + P'''_{rad,fuel}(i) + P'''_{conv}(i)] - P'''_{rad,pertes} \quad (10)$$

où T , ρ_{WFF} , et $c_{p_{WFF}}$ sont respectivement la température, la masse volumique et la chaleur spécifique des éléments fins humides, $N_f(t)$ est le nombre de sites du front de flammes qui, à l'instant t , contribuent à la dégradation du site exposé.

Il convient de préciser que si la sommation porte sur l'ensemble des sites en feu à l'instant t , un site exposé n'est pas systématiquement touché par le rayonnement de la flamme, le rayonnement des braises et la convection provenant du site en feu. Par exemple, un site exposé à un site en feu peut être soumis au rayonnement de la flamme sans pour autant être préchauffé par convection s'il ne se trouve pas dans le sillage du site en feu ou par le rayonnement des braises s'il se trouve trop éloigné du site en feu.

La chaleur spécifique des éléments fins humides se déduit de celles des éléments fins secs, $c_{p_{DFE}}$, et de l'eau, $c_{p_{eau}} = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, par la relation suivante :

$$m_{WFF0} c_{p_{WFF}} = m_{DFE0} c_{p_{DFE}} + m_{eau0} c_{p_{eau}} \quad (11)$$

Où m_{eau0} et m_{DFE0} sont les masses initiales d'eau et d'éléments fins secs pour un site donné.

Si l'on fait intervenir la teneur initiale en eau sur masse sèche, FMC_0 (tas : Fuel Moisture Content), définie comme le rapport de la masse d'eau contenue dans les éléments fins de végétation par la masse sèche de ces mêmes éléments fins, $FMC_0 = m_{eau0}/m_{DFE0}$, il vient :

$$c_{p_{WFF}} = \frac{1}{(1 + FMC_0)} c_{p_{DFE}} + \frac{FMC_0}{(1 + FMC_0)} c_{p_{eau}} \quad (12)$$

2ème phase : Si $T = T_{vap}$:

$$-\rho_{DFE} L_{vap} \alpha \frac{dFMC}{dt} = \sum_{i=1}^{N_f(t)} [P'''_{rad,fl}(i) + P'''_{rad,fuel}(i) + P'''_{conv}(i)] - P'''_{rad,pertes} \quad (13)$$

Dans cette équation, $L_{vap} = 2.25 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 373K.

3ème phase: Si $T_{vap} < T < T_{pyr}$:

$$\rho_{DFE} c_{p,DFE} \alpha \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^{N_f(t)} [P'''_{rad,fl}(i) + P'''_{rad,fuel}(i) + P'''_{conv}(i)] - P'''_{rad,pertes} \quad (14)$$

4ème phase : Si $T = T_{pyr}$:

$$-\rho_{DFE} L_{pyr} \alpha \frac{dFPC}{dt} = \sum_{i=1}^{N_f(t)} [P'''_{rad,fl}(i) + P'''_{rad,fuel}(i) + P'''_{conv}(i)] - P'''_{rad,pertes} \quad (15)$$

L_{pyr} est la chaleur latente de pyrolyse et FPC est la teneur en produits de pyrolyse des éléments secs fins. Elle est définie à l'instant initial par : $FPC_0 = m_{pyr0}/m_{DFE0}$, soit $FPC_0 = 1 - v_{char}$, où v_{char} est la teneur initiale en résidu carbonneux des éléments fins secs. Si la pyrolyse est complète, il ne reste que du résidu carbonneux.

Explicitons maintenant chacun des termes de l'équation de bilan d'énergie.

- Contribution radiative de la flamme

La puissance radiative reçue par un site distant (j) provenant d'un site en feu (i) est calculée en couplant un modèle de flamme solide et la méthode de Monte Carlo. Si N''' (m^{-3}) est le nombre de quanta par unité de volume reçus par le site (j), milieu végétal d'absorptivité a_{fb} , et si chacun de ces quanta transporte une puissance élémentaire p (W), alors on peut écrire simplement :

$$P'''_{rad,fl} = a_{fb} N''' p \quad (16)$$

Nous reviendrons par la suite en détail sur le calcul des termes N''' et p .

- Contribution radiative des braises à l'intérieur de la strate végétale en feu

Les sites les plus proches d'un site en feu peuvent être exposés au rayonnement des braises, c'est à dire à l'intérieur même de la strate végétale. Les braises situées sur le front rayonnent donc vers les sites imbrûlés avec une transmittance, $\tau = \exp(-y/\delta)$ où y est la distance entre le site en feu et le site récepteur (Hottel , 1965). La puissance rayonnée à l'intérieur de la strate est alors :

$$P'''_{rad, fuel} = -a_{fb} P''_b \frac{d\tau}{dy} = a_{fb} P''_b \frac{1}{\delta} \exp\left(-\frac{y}{\delta}\right) \quad (17)$$

Où P''_b est le pouvoir émissif des braises, $P''_b = \varepsilon_b \sigma T_b^4$. σ est ici la constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-4}$). L'émissivité des braises est supposée égale à 1 (corps noir).

On peut noter que la longueur caractéristique qui apparaît dans la relation précédente est bien la longueur de pénétration du rayonnement et non la longueur effective, contrairement au rayonnement provenant de la flamme dont la longueur de pénétration ne peut excéder la hauteur de strate.

- Pertes radiatives du site exposé au feu :

Le site végétal exposé au feu est l'objet de pertes radiatives au profit du milieu ambiant. Elles s'expriment comme suit :

$$P'''_{rad, pertes} = \frac{\varepsilon_{fb} \sigma (T^4 - T_\infty^4)}{\delta_{eff}} \quad (18)$$

où ε_{fb} est l'émissivité du lit végétal et T_∞ la température du milieu ambiant.

- Puissance convective reçue par le site exposé au feu

On ne considère ici que la convection forcée induite par le vent, ce qui revient à négliger les effets de flottabilité dus à la gravité.

Le front ne constitue pas une barrière imperméable au vent. En raison des effets tridimensionnels, le vent peut traverser ce front et préchauffer les sites situés devant ce front (Beer, 1990). Plus précisément, un site sera affecté par un site en feu s'il se trouve dans le sillage convectif de ce site en feu.

La puissance convectée s'écrit (Koo et al., 2005):

$$P'''_{conv} = \frac{h}{\delta_{eff}} (T_{fl} - T) \exp(-0.3 y/L_{fl}) \quad (19)$$

où h est le coefficient de convection moyen, T_{fl} la température de flamme et L_{fl} sa longueur.

Cette relation suppose que la différence de température décroît exponentiellement avec la distance y au front de flammes (Pagni et Peterson, 1973), avec une longueur caractéristique d'environ trois fois la longueur de flamme (i.e. $L_{fl}/0.3$).

Le coefficient convectif est calculé à partir de la corrélation de Pagni et Peterson (1973):

$$h = \frac{k_{fl}}{y} 0.037 Re_y^{0.8} Pr^{1/3} \quad (20)$$

Le nombre de Reynolds, $Re_y = Uy/\nu$, est basé sur la norme de la vitesse tangentielle du vent qui s'exprime comme :

$$U = |\mathbf{n} \wedge (\mathbf{U} \wedge \mathbf{n})| \quad (21)$$

\mathbf{n} étant la normale au terrain.

Le nombre de Prandtl Pr , la viscosité cinématique ν , et la conductivité thermique k_{fl} sont celles de l'air évaluées à la température de flamme.

Remarque :

Un site en feu ne peut préchauffer par convection un site végétal que si ce dernier se trouve dans le sillage du site en feu, c'est-à-dire dans une direction parallèle à celle du vent.

2.2.1.2 Effet d'écran

Pour illustrer la notion d'écrantage, considérons un site en feu (i) dont le rayonnement émis peut toucher un site distant (j). En présence d'un site en feu intercalé entre les sites (i) et (j) (Figure 16), le site (j) ne reçoit qu'une partie du rayonnement émis.

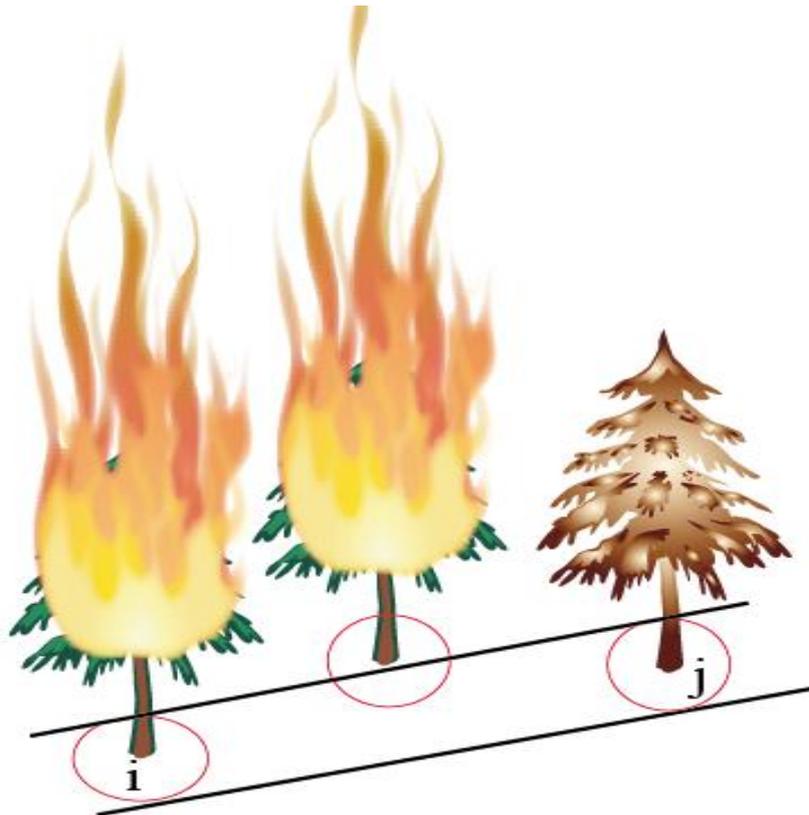


Figure 16 : Ecrantage : le site en feu intercalé entre le site en feu (i) et le site récepteur (j) joue le rôle d'écran.

L'effet d'écran peut être facilement pris en compte par la méthode Monte Carlo en considérant qu'un quantum émis par le site (i) et arrivant dans la zone de flamme solide d'un site intercalé entre les sites (i) et (j) est perdu et ne contribue pas à préchauffer le site (j).

Si le site en feu est entouré par des sites en feu, sa contribution radiative au rayonnement reçu par la végétation encore intacte est nulle.

2.2.1.3 Critère d'inflammation

Le critère d'inflammation pilotée repose le plus souvent sur une température critique T_{ign} , qui dépend du végétal et de ses propriétés thermo-physiques (*Tableau 2*). La détermination des températures et flux critiques d'inflammation des végétaux se fait le plus souvent à partir d'essais sous cône calorimètre (Mindykowski et al., 2009 ; Zaïda, 2012).

Le présent modèle utilise un critère d'inflammation différent puisque il suppose que l'inflammation a lieu lorsque la température du végétal atteint la température de pyrolyse et que la pyrolyse a produit suffisamment de gaz combustibles (limite inférieure d'inflammabilité) pour que la combustion se déclenche et s'auto-entretienne.

Pour comprendre la signification physique de ce critère, on peut établir, moyennant certaines hypothèses, son équivalence avec l'énergie critique d'inflammation en supposant que le milieu est thermiquement fin et que la vitesse de chauffe (dT/dt) est constante.

Pour cela, calculons l'énergie nécessaire pour que des éléments fins et humides de végétation (WFF) contenus dans un volume $V_{eff} (= \delta_{eff} S_{site})$ exposés au feu s'échauffent jusqu'à atteindre leur température de vaporisation T_{vap} , se déshydratent, que ces éléments fins secs (DFF) s'échauffent jusqu'à leur température de pyrolyse, T_{pyr} , pyrolysent et s'enflamment après avoir libérés une masse de produits gazeux combustibles $m_{pyr,cr}$ correspondant à une teneur critique FPC_{cr} :

$$\begin{aligned}
 E = & V_{eff} \rho_{WFF} c_{p_{WFF}} \alpha \int_{T_{\infty}}^{T_{vap}} dT - V_{eff} \rho_{DFF} \alpha L_{vap} \int_{FMC_0}^0 d(FMC) + .. \\
 & .. + V_{eff} \rho_{DFF} c_{p_{DFF}} \alpha \int_{T_{vap}}^{T_{pyr}} dT - V_{eff} \rho_{DFF} \alpha L_{pyr} \int_{FPC_{cr}}^0 d(FPC) \quad (22)
 \end{aligned}$$

Soit

$$E = V_{eff} [\rho_{WFF} c_{p_{WFF}} \alpha (T_{vap} - T_{\infty}) + \rho_{DFE} L_{vap} \alpha FMC_0 + \rho_{DFE} c_{p_{DFE}} \alpha (T_{pyr} - T_{vap}) + \rho_{DFE} L_{pyr} \alpha FPC_{cr}] \quad (23)$$

En considérant les masses initiales d'eau, des éléments fins secs et des éléments fins humides, cette énergie devient :

$$E = \frac{V_{eff}}{V} [m_{WFF} c_{p_{WFF}} (T_{vap} - T_{\infty}) + m_{eau} L_{vap} + m_{DFE} c_{p_{DFE}} (T_{pyr} - T_{vap}) + m_{pyr,cr} L_{pyr}] \quad (24)$$

Sachant que :

$$\frac{V_{eff}}{V} = \frac{\delta_{eff} S_{site}}{HS_{site}} = \frac{\delta_{eff}}{H}$$

(si le rayonnement pénètre l'intégralité du lit, ce rapport est égal à 1), cette énergie s'écrit :

$$E = \frac{\delta_{eff}}{H} [m_{WFF} c_{p_{WFF}} (T_{vap} - T_{\infty}) + m_{eau} L_{vap} + m_{DFE} c_{p_{DFE}} (T_{pyr} - T_{vap}) + m_{pyr,cr} L_{pyr}] \quad (25)$$

Cette énergie n'est autre que l'énergie critique d'inflammation. Dans l'hypothèse où l'inflammation a lieu aussitôt que la température du végétal atteint la température de pyrolyse, on a alors : $FPC_{cr} = 0$.

2.2.2 Modèle de rayonnement

Comme nous l'avons déjà mentionné, le modèle radiatif repose sur le couplage du modèle de flamme solide (MFS) et de la méthode de Monte Carlo (MMC). Le modèle MFS requiert un certain nombre de paramètres, à savoir les propriétés géométriques de la flamme, sa température et son pouvoir émissif. Ces paramètres, nous le verrons, sont déterminés de façon empirique. Une partie

du rayonnement émis par les flammes peut être absorbé ou diffusé par la couche d'air atmosphérique. Ce phénomène d'atténuation du rayonnement est pris en compte dans le modèle.

2.2.2.1 Modèle de flamme solide (MFS)

Dans le modèle de flamme solide, la flamme est assimilée à un solide de géométrie simple (ici, un cylindre) dont seules les surfaces rayonnent. De plus, seule la partie visible de la flamme émet du rayonnement vers la cible et ce, de manière uniforme sur toute sa surface, ce qui revient à considérer une flamme homogène de température, d'émissivité et de composition uniformes et constantes.

Le MFS utilise les propriétés géométriques de la flamme, c'est-à-dire son diamètre, sa hauteur et son angle d'inclinaison, ainsi que certaines propriétés thermo-physiques, c'est-à-dire son pouvoir émissif et sa température. Le diamètre D est pris égal au diamètre du site végétal de forme cylindrique. Les autres paramètres sont déterminés comme suit. L'influence de certains d'entre eux sur la propagation du feu sera évaluée grâce à une étude de sensibilité.

Hauteur de flamme

La hauteur visible d'une flamme en absence du vent, H_{f10} (m), peut être alors estimée grâce à la corrélation de Heskestad (1983) :

$$H_{f10} = 0.0148\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (26)$$

Le terme \dot{Q} est la puissance dégagée par la combustion (en W), que nous expliciterons par la suite.

Sous l'effet d'un vent latéral, la hauteur de flamme diminue. Putnam (1965) propose une corrélation empirique donnant la hauteur de la flamme en fonction du nombre de Froude basé sur la hauteur de la flamme sans l'effet du vent H_{f10} . Ce nombre de Froude est défini par la relation :

$$Fr_0 = U / \sqrt{gH_{f10}}$$

La corrélation de Putnam s'écrit :

$$H_{fl} = H_{fl0}(1 + 4Fr_0^2)^{-0.5} \quad (27)$$

Angle d'inclinaison de la flamme sous l'effet du vent

D'après Albin (1981), l'angle de flamme, défini comme l'angle entre l'axe de la flamme et la verticale, est directement proportionnel à la racine carrée du nombre de Froude basé sur la hauteur de la flamme, $Fr = U/\sqrt{gH_{fl}}$.

La corrélation d'Albin s'écrit :

$$\tan \alpha = 1.22Fr \quad (28)$$

Longueur de la flamme

Les premiers travaux sur l'influence du vent sur les propriétés de flamme sont dus à Thomas et al. (1961) et Thomas (1963). Ces auteurs ont effectué des mesures de longueur de flammes générées par la combustion de tas de bois. Ils ont montré que la longueur variait comme $Fr^{-0.11}$ où Fr est le nombre de Froude basé sur l'épaisseur du front. Cet exposant de -0.11 suggère un effet relativement limité du vent sur la longueur de flamme, la faible décroissance étant due à un entrainement du panache plus efficace. Cette faible dépendance a été également obtenue expérimentalement par Anderson et Rothermel (1965), puis par la simulation par Nmira et al. (2010). La présente étude s'appuie donc sur ces conclusions pour supposer que la longueur de flamme n'est pas affectée par le vent.

Pouvoir émissif de la flamme

Le pouvoir émissif par unité de surface de la flamme peut être alors évalué en supposant que seule la surface latérale de la flamme solide, $S_{fl} = \pi DL_{fl}$ rayonne et, en utilisant l'hypothèse de Markstein, qu'une fraction χ_r de la puissance libérée par la combustion \dot{Q} est perdue par

rayonnement au profit du milieu environnant. De sorte que le pouvoir émissif s'exprime de la façon suivante :

$$P''_{fl} = \frac{\chi_r \dot{Q}}{S_{fl}} \quad (29)$$

Le paramètre χ_r est un paramètre difficile à estimer. Il varie en fonction du combustible végétal (Brzustowski et Sommer, 1971) et de l'échelle du feu (McCaffrey, 1995). Pour des feux de palettes, Quintiere (1997) a estimé sa valeur entre 0.2 et 0.4.

Température moyenne de la flamme

En assimilant la flamme de végétation à un corps gris, la température moyenne de la flamme peut être déduite du pouvoir émissif comme suit:

$$T_{fl} = \left(\frac{P''_{fl}}{\varepsilon_{fl} \sigma} \right)^{1/4} \quad (30)$$

Où ε_{fl} est l'émissivité de la flamme. Elle est fonction de l'émissivité des produits gazeux de combustion et de l'émissivité des suies. Bard et Pagni (1985) proposent, pour les combustibles cellulosiques :

$$\varepsilon_{fl} = 1 - e^{-\kappa_{fl} L_{fl}} \quad (31)$$

Où κ_{fl} est le coefficient d'extinction de la flamme.

Puissance libérée par la combustion avec flamme d'éléments fins de végétation

Les paramètres du MSF dépendent de la hauteur visible d'une flamme en absence du vent et, par conséquent, de la puissance libérée par la combustion avec flamme des produits de pyrolyse des éléments fins végétaux. Ces éléments fins, définis comme les éléments dont le diamètre est inférieur à 6 mm (Luke and Macarthur, 1977), sont responsables de la propagation du feu, alors que les éléments plus épais brûlent, plus lentement, en arrière du front du feu. Cela résulte de

comportements thermiques très différents face à une agression thermique. Prenons des particules cylindriques par exemple. Il est facile de montrer que, pour des particules fines (des aiguilles de pin, par exemple), le temps de combustion est proportionnel à leur diamètre ($t_c \propto d$), alors qu'il est proportionnel au carré du diamètre pour des éléments épais ($t_c \propto d^2$). En d'autres termes, si l'on double le diamètre d'un élément fin de végétation, il mettra deux fois plus de temps pour brûler alors qu'un végétal thermiquement épais mettra quatre fois plus de temps. Ceci explique que l'on ne s'intéresse pour la propagation qu'aux particules thermiquement fines.

La puissance dégagée par la combustion s'écrit, dans l'hypothèse où les produits de pyrolyse sont majoritairement libérés au travers de la surface supérieure du site de forme cylindrique ($S_{site} = \pi D^2/4$) :

$$\dot{Q} = S_{site} \times \Delta h_c \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \dot{m}''_{pyr} dt \quad (32)$$

Le terme t_c est le temps de résidence de flamme (*i.e.* la durée pendant laquelle une flamme visible existe au-dessus du combustible), \dot{m}''_{pyr} représente le débit-masse de produits de pyrolyse par unité de surface et Δh_c leur chaleur de combustion.

Sachant que la pyrolyse complète de la particule végétale sèche conduit à la formation d'une masse de produits gazeux de pyrolyse $(1 - \nu_{char})m_{DFP}$ et d'une masse $\nu_{char}m_{DFP}$ de résidu charbonneux⁷, on peut écrire :

$$\dot{m}''_{pyr} = (1 - \nu_{char})\dot{m}''_{DFP} \quad (33)$$

Si l'on considère le débit de pyrolyse comme constant durant t_c , on peut alors relier ce débit à la masse par unité de surface des éléments fins secs : $\dot{m}''_{DFP} = \dot{m}''_{DFP}/t_c$. A titre d'exemple, la *Figure 17* donne l'évolution temporelle de la perte de masse mesurée au NIST lors de tests de combustion sur des Pins Douglas d'environ 2m (Mell et al., 2009) et l'approximation d'un créneau pendant t_c , mesuré à environ 20 s.

⁷ Les cendres (contenu minéral) sont produites par l'oxydation du résidu charbonneux.

On peut alors écrire :

$$\dot{Q} = S_{site} \times \Delta h_c \frac{(1 - v_{char})m''_{DFE}}{t_c} \quad (34)$$

Ou, en introduisant la teneur en eau initiale du combustible $FM C_0$ qui relie les masses initiales humide et sèche du végétal ($m''_{DFE} = m''_{WFF}/(1 + FM C_0)$):

$$\dot{Q} = S_{site} \times \Delta h_c \frac{(1 - v_{char})m''_{WFF}}{t_c(1 + FM C_0)} \quad (35)$$

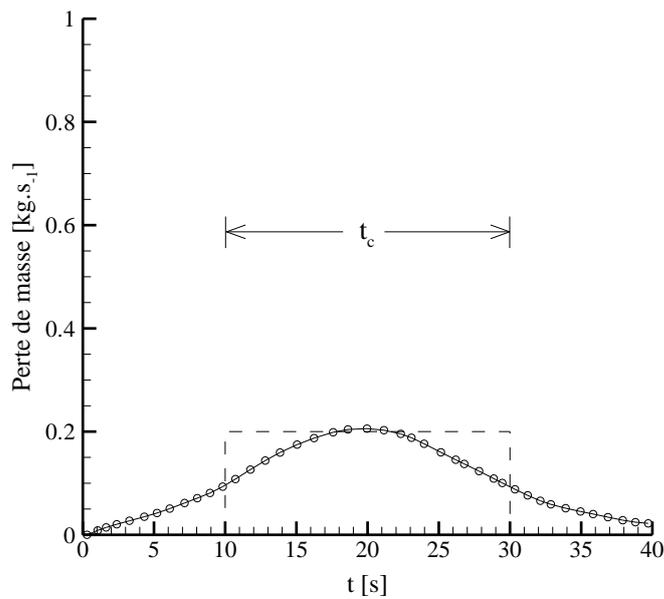


Figure 17 : (○) Evolution au cours du temps de la perte de masse mesurée par le NIST lors de la combustion de pins Douglas. En trait pointillé, le débit masse est supposé constant pendant le temps de combustion avec flamme, t_c .

2.2.2.2 Méthode Monte Carlo (MMC)

La méthode de Monte Carlo (MMC) fut développée à la fin de la seconde guerre mondiale, pour l'étude de la diffusion des neutrons dans un matériau fissile. Basée sur l'utilisation de nombres aléatoires, elle porte ce nom en référence à la principauté du même nom, connue pour ses casinos.

De manière générale, la MMC consiste à modéliser un phénomène physique par une suite de processus aléatoires à l'issue desquels on calcule les variables d'état du système en moyennant les valeurs obtenues après un grand nombre d'épreuves. Tirant profit de l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs, les applications n'ont cessé de se diversifier : en mathématique tout d'abord, pour le calcul d'intégrales, en analyse financière pour tenir compte de l'incertitude des paramètres en leur affectant une distribution de probabilité (propagation d'erreurs), ou encore pour la modélisation du transport de particules dans leur environnement. C'est précisément dans cette dernière catégorie d'applications que s'inscrit la modélisation du transfert radiatif par MMC.

La méthode de Monte-Carlo consiste à évaluer les transferts radiatifs par la simulation d'un grand nombre de trajectoires de particules dans le système considéré. La grandeur physique, ici le flux radiatif est alors calculé par la moyenne de l'observable microscopique correspondante. Concrètement, on représente la propagation d'un ensemble de photons comme une succession d'évènements élémentaires (émission, absorption, réflexion, diffusion, ...) dont les caractéristiques (direction d'émission, longueur parcourue avant absorption, ...) sont fixées de façon aléatoire. On suit pour cela des densités de probabilité telles que, après avoir simulé l'histoire d'un grand nombre de paquets de photons, les lois macroscopiques du rayonnement (émission, absorption par un élément de volume ou une surface, extinction de la luminance le long d'un chemin optique, ...) soient statistiquement vérifiées.

La MMC, présentée de façon plus générale dans les ouvrages de base en rayonnement, y est décrit comme un moyen efficace de calcul des facteurs de forme en géométries complexes (Modest, 1993 ; Siegel et Howell, 2001 ; Brewster ; 1992). Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer au cours de Lemonnier et Porterie (2012).

Emission depuis la surface de flamme

La surface de flamme est supposée grise et diffuse (ou lambertienne), de sorte que l'émissivité est indépendante de la direction d'émission.

On considère un élément de la surface de flamme dA d'émissivité ε , supposé isotherme à la température T_f .

Le flux émis par dA dans un angle solide $d\Omega$ autour de Ω est :

$$dQ_{dA}(W) = \varepsilon \frac{\sigma T_{fl}^4}{\pi} \vec{\Omega} \cdot \vec{n} dA d\Omega \quad (36)$$

Puisque $\vec{\Omega} \cdot \vec{n} = \cos \theta$ et $\Omega = \sin \theta d\theta d\psi$, on obtient la loi macroscopique :

$$dQ_{dA} = \varepsilon \frac{\sigma T_{fl}^4}{\pi} dA \cos \theta \sin \theta d\theta d\psi \quad (37)$$

Le flux total émis dans le demi-espace est alors, après intégration :

$$Q_{dA}(W) = \varepsilon \frac{\sigma T_{fl}^4}{\pi} dA \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\psi=0}^{2\pi} \cos \theta \sin \theta d\theta d\psi \quad (38)$$

Sans considération spectrale, on introduit la puissance transportée par un quantum q comme étant une fraction de la puissance émise par la surface dA . Ainsi, la puissance véhiculée par un quantum dans une simulation comportant N quanta s'exprime :

$$p(W) = \frac{\varepsilon \sigma T_{fl}^4 dA}{N} \quad (39)$$

Le flux émis par dA dans un angle solide $d\Omega$ autour de $\vec{\Omega}$ s'écrit maintenant :

$$dQ_{dA} = p \frac{N}{\pi} \cos \theta \sin \theta d\theta d\psi \quad (40)$$

En pratique, l'émission d'un quantum correspond à la génération aléatoire des angles θ et ψ suivant des lois de probabilités respectant la loi macroscopique. Il nous faut donc calculer les densités de probabilité et les fonctions de répartition des variables aléatoires indépendantes θ et ψ .

Le nombre de quanta émis entre $\theta = x$ et $\theta = x + \Delta x$, ψ restant dans un intervalle donné $\Delta\psi$, s'écrit $\frac{N\Delta\psi}{\pi} \cos x \sin x \Delta x$. La probabilité pour qu'un quantum soit émis dans cet intervalle s'écrit :

$$P(x \leq \theta \leq x + \Delta x) = \frac{\frac{N\Delta\psi}{\pi} \cos x \sin x \Delta x}{\frac{N\Delta\psi}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos x \sin x dx} = 2 \cos x \sin x \Delta x \quad (41)$$

La densité de probabilité étant la limite de la loi de probabilité quand l'intervalle tend vers 0, on obtient :

$$f_{\theta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x \leq \theta \leq x + \Delta x)}{\Delta x} = 2 \cos x \sin x \quad (42)$$

L'intégration de la densité de probabilité permet de calculer la fonction de répartition :

$$F_{\theta x} = \int_0^x 2 \cos x \sin x dx = \sin^2 x \quad (43)$$

En faisant de même pour ψ on obtient :

$$F_{\psi x} = \frac{x}{2\pi} \quad (44)$$

En inversant les fonctions de répartition et en générant aléatoirement deux variables aléatoires R_θ et R_ψ selon une distribution uniforme sur $[0 ; 1]$, on a à notre disposition un générateur d'angles qui respecte statistiquement la loi macroscopique d'émission d'une surface isotrope.

$$\begin{aligned}\theta &= \sin^{-1}\sqrt{R_\theta} \\ \psi &= 2\pi R_\psi\end{aligned}\tag{45}$$

En conclusion, pour simuler le flux radiatif $Q_{dA}(W) = \varepsilon\sigma T_{fl}^4 dA$ émis par un élément de surface de flamme dA , on envoie N quanta de puissance $p(W) = Q_{dA}/N$ dans la direction $\theta = \sin^{-1}\sqrt{R_\theta}$ et $\psi = 2\pi R_\psi$, où R_θ et R_ψ sont générés aléatoirement.

Dans la pratique cette mise en œuvre nécessite d'attribuer à chaque cellule émettrice un repère local dont la normale est orientée vers l'extérieur de la source.

La flamme est donc subdivisée en N_s surfaces élémentaires. Chaque surface élémentaire, repérée par l'indice i , possède son propre repère localisé au barycentre de la surface. Depuis le barycentre est tiré un certain nombre de quanta : $N_i = N'' dS_i$ où N'' est le nombre de quanta tirés par m^2 de surface de flamme.

Si N''' est le nombre de quanta par unité de volume reçus par un site exposé et si chacun de ces quanta transporte une puissance élémentaire p (W), alors on obtient la puissance radiative par unité de volume qui apparaît dans le bilan d'énergie du site exposé :

$$P'''_{rad,fl} = N'''p\tag{46}$$

Aspect géométrique

La base $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{n})$ est liée à une maille du cylindre. Il s'agit d'une base locale. Le faisceau d'énergie est envoyé aléatoirement dans l'espace à partir du centre de la maille. L'énergie qu'il véhicule est liée directement au pouvoir émissif de la flamme. Une grande sphère fictive de rayon R_{sphere} englobe le cylindre et le domaine d'étude.

On détermine d'abord les coordonnées du point P_s , point d'intersection du faisceau d'énergie représenté par une droite avec la grande sphère dans la base locale $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{n})$.

Soit C le centre de la maille. La droite fait un angle θ avec la normale à la maille et un angle φ avec le vecteur \vec{u} dans le plan (\vec{u}, \vec{v}) . Les coordonnées du point P_s dans le repère local $(C, \vec{u}, \vec{v}, \vec{n})$ s'écrivent alors :

$$\begin{cases} X_L = R_{sphere} \sin(\theta) \cos(\varphi) \\ Y_L = R_{sphere} \sin(\theta) \sin(\varphi) \\ Z_L = R_{sphere} \cos(\theta) \end{cases} \quad (47)$$

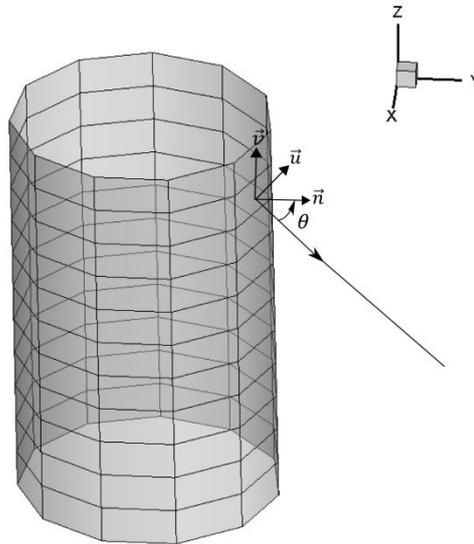


Figure 18. Faisceau d'énergie partant de la maille de la flamme assimilée à un cylindre dans le cadre du modèle de flamme solide.

On veut maintenant exprimer les coordonnées (X, Y, Z) du même point mais dans le repère global $(C, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ donc il suffit d'exprimer les vecteurs \vec{u}, \vec{v} et \vec{n} dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. Il s'en suit :

$$\begin{cases} X = X_L u_x + Y_L v_x + Z_L n_x \\ Y = X_L u_y + Y_L v_y + Z_L n_y \\ Z = X_L u_z + Y_L v_z + Z_L n_z \end{cases} \quad (48)$$

Les indices x, y et z font référence aux composantes respectivement sur les axes du repère global. Ayant les coordonnées du point P_s , on connaît alors le vecteur directeur de la droite (CP_s).

Pour exclure le second point d'intersection de la droite avec la sphère, il est impératif que le faisceau aille vers l'avant donc on impose comme condition que le produit scalaire du vecteur directeur de la droite avec la normale à la maille soit positif.

2.2.2.3 Atténuation par la couche d'air traversée

L'atténuation du rayonnement lors de sa traversée d'une couche d'air atmosphérique n'est pas négligeable. Un modèle approché permettant de disposer d'un coefficient de transmittance moyen en fonction de l'humidité de l'air et de l'épaisseur traversée est ici développé. Sa mise en œuvre est relativement aisée par la MMC : le coefficient d'atténuation moyen déterminé permet, via la loi macroscopique d'atténuation de la luminance, de calculer une probabilité d'absorption. Après avoir calculé la distance de l'éventuel trajet d'un quantum, sa probabilité de transmission est déterminée à l'aide du modèle approché. La comparaison entre cette probabilité et un nombre aléatoire de distribution homogène sur $[0 ; 1]$ définira si le quantum est absorbé par l'air ou non.

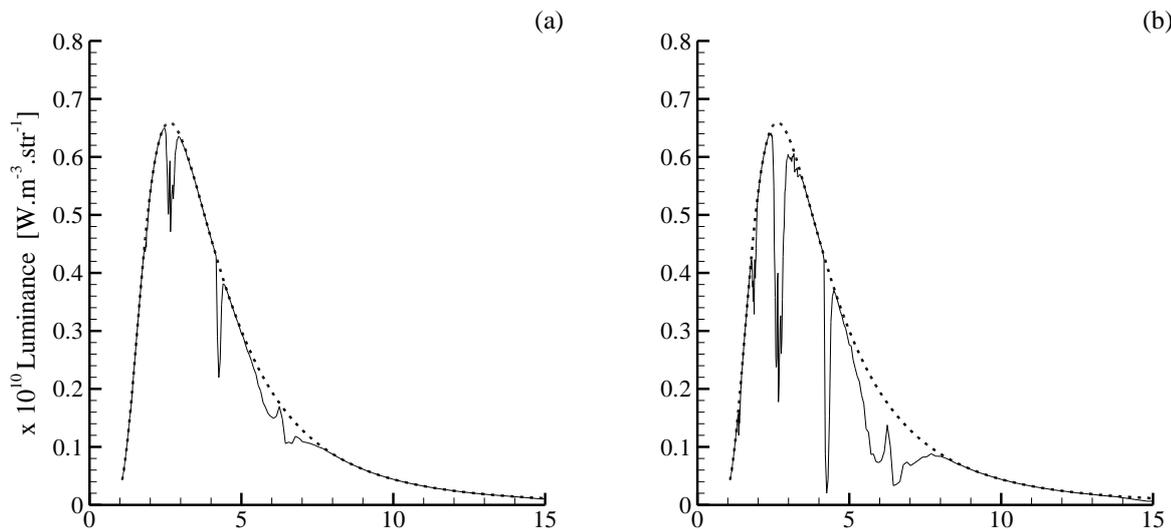
De la transmittance spectrale au coefficient d'absorption moyen

En ce qui concerne la composition de l'air, les fractions volumiques de dioxygène, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone et d'azote sont calculées, en fonction de la fraction volumique de vapeur d'eau, à partir des relations suivantes :

$$\begin{aligned}
f_{v,O_2} &= 0,209475(1 - f_{v,H_2O}) \\
f_{v,CO_2} &= 3,22 \cdot 10^{-4}(1 - f_{v,H_2O}) \\
f_{v,CO} &= 1,9 \cdot 10^{-7}(1 - f_{v,H_2O}) \\
f_{v,N_2} &= 1 - f_{v,H_2O} - f_{v,CO_2} - f_{v,CO}
\end{aligned}
\tag{49}$$

L'atténuation du rayonnement émis par un corps noir à 1100 K est simulée à l'aide du modèle SNB (Billaud, 2011). La composition de l'air, considéré à 300 K, est calculée pour une humidité de 30%. Les courbes de la *Figure 19*, donnant la luminance en fonction de la longueur d'onde, montrent l'influence de l'épaisseur de la couche d'air atmosphérique traversée.

A faible distance (diagramme a), le spectre présente une atténuation de la luminance à des longueurs d'ondes particulières. Les bandes d'absorptions situées à 2,6 μm et 4,3 μm sont caractéristiques du CO_2 , celles situées à 2,7 μm et 5,9 μm de la vapeur d'eau. Lorsque la distance augmente, ces bandes se creusent et s'élargissent (diagramme b) et (diagramme c), et de nouvelles bandes d'absorption apparaissent à 15 μm (CO_2) ainsi qu'à 1,3 μm et 1,8 μm (H_2O). A 1000 m de distance (diagramme d), le spectre n'a que très peu évolué hormis un élargissement des bandes.



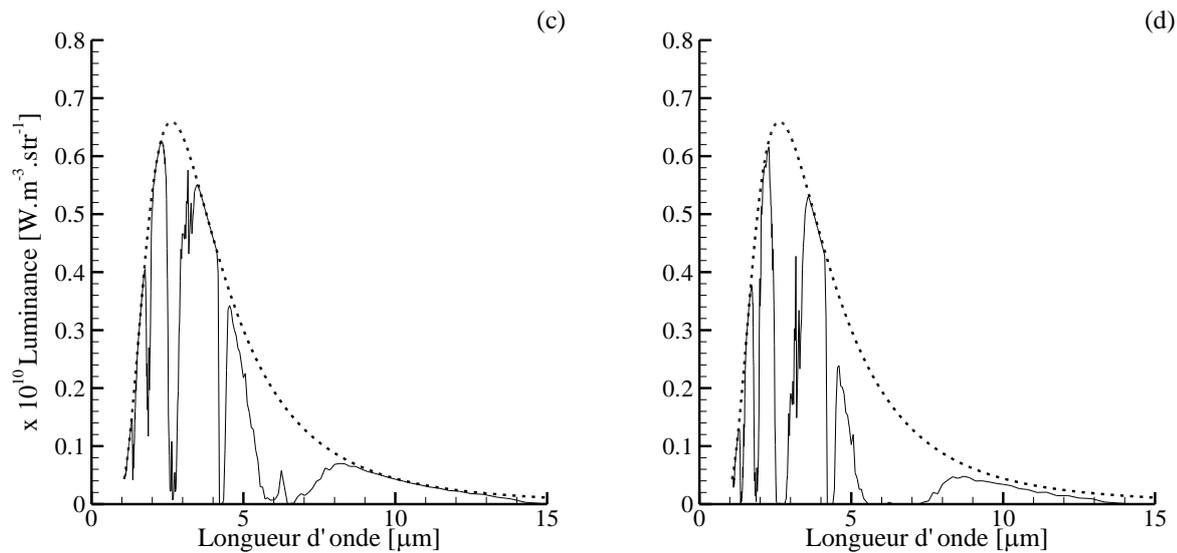


Figure 19 : Luminance spectrale du rayonnement émis par un CN à 1100 K (en pointillés), puis atténué par une couche d'air (en trait plein) de: (a) 1 m, (b) 10 m, (c) 100 m, (d) 1000 m.

Influence de la teneur en eau de l'air

Dans cette partie nous discutons du rôle de l'hygrométrie sur l'atténuation du rayonnement émis par un corps noir à 1100 K.

La Figure 20 montre que la transmittance moyenne diminue lorsque l'épaisseur de la couche d'air traversée augmente. Cette dépendance est d'autant plus marquée que l'humidité relative est élevée. Par exemple pour $l=200$ m, une augmentation de l'humidité relative de 0 à 1% entraîne une diminution de la transmittance moyenne de l'ordre de 12%, alors qu'une augmentation de l'humidité de 50% à 51% ne modifie que très peu la transmittance moyenne.

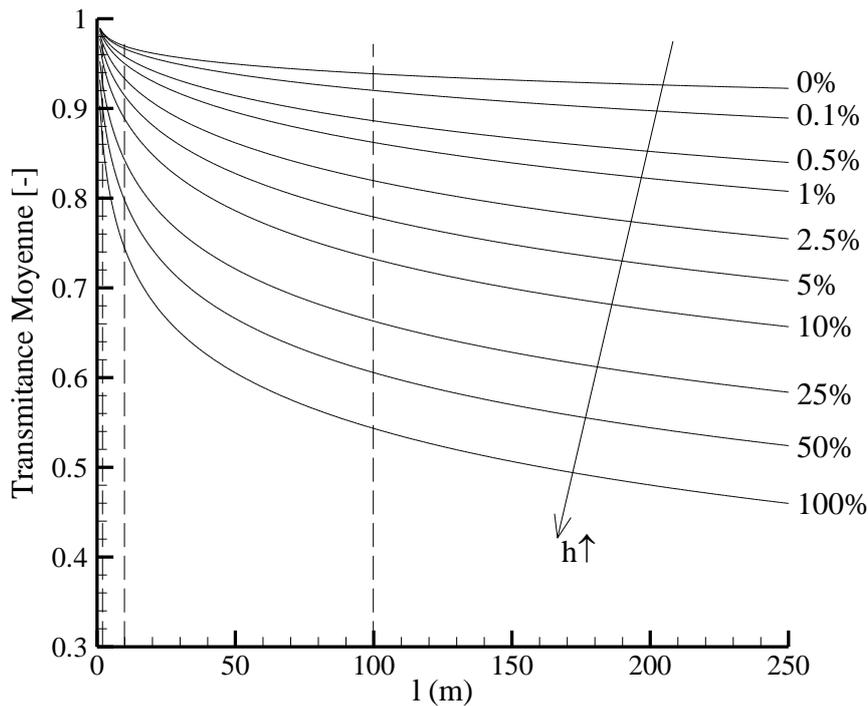


Figure 20 : Transmittance moyenne de l'air en fonction de l'épaisseur de la couche d'air traversée pour différentes hygrométries.

Développement d'un modèle approché

La stratégie retenue est de disposer d'une loi d'atténuation du rayonnement par une couche d'air atmosphérique dont l'humidité relative est comprise entre 10 et 100%. Les courbes d'évolution de la transmittance moyenne en fonction de l'épaisseur l de la couche d'air sont approximées par une relation de la forme $\bar{\tau}_{approx} = a + bl^c$ et ce, pour des humidités relatives de 10, 25, 50 et 100%. Les coefficients a , b et c , ainsi que le coefficient de détermination, R^2 , sont donnés dans le Tableau 3.

Le calcul de la transmittance moyenne d'une couche d'air d'humidité relative H se fait ensuite par simple interpolation linéaire à l'aide des coefficients du Tableau 3.

La méthode proposée repose sur la détermination de valeurs de référence pour quatre valeurs d'humidité relative et une température du CN de 1100 K. Pour évaluer les erreurs engendrées par ces approximations sur la transmittance, 10^6 calculs ont été menés en faisant varier aléatoirement

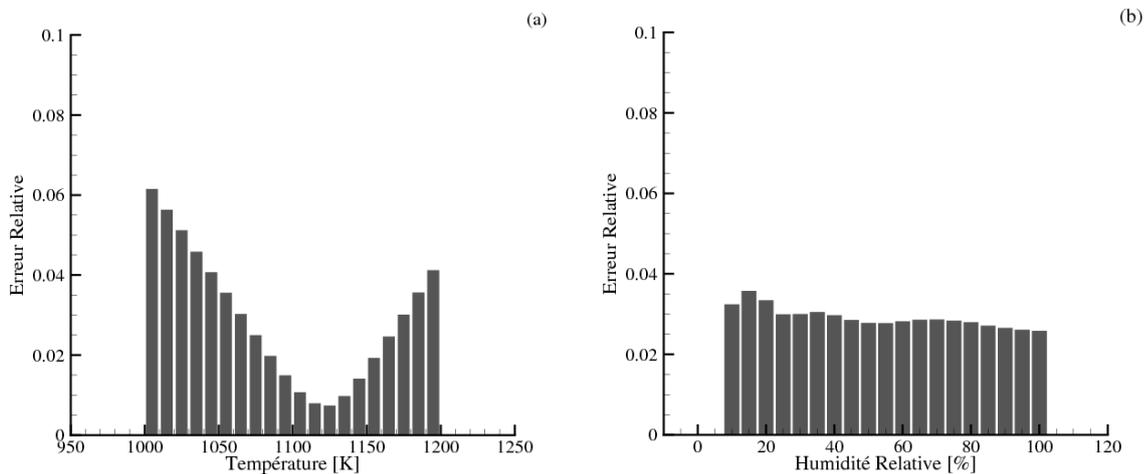
les paramètres T_s , H et l suivant une distribution uniforme sur les intervalles respectifs [1000-1200 K], [10-100%] et [1-100 m].

Les erreurs engendrées sur la transmittance moyenne de la couche d'air lorsque l'on fait varier la température d'émission du CN, l'humidité relative et l'épaisseur de la couche d'air traversée sont faibles, respectivement de l'ordre de 6%, 3% et 3% (*Figure 21*).

Ce modèle approché est utilisé dans les simulations de propagation d'incendie.

Humidité relative	a	b	c	R ²
10%	1,09633	-0,12039	0,24126	0,99961
25%	1,21334	-0,25274	0,16976	0,99946
50%	1,40724	-0,46654	0,11804	0,99955
100%	1,79151	-0,88106	0,07584	0,99973

Tableau 3 : Paramètres de la régression linéaire de la transmittance moyenne en fonction de l'humidité relative de la couche d'air traversée.



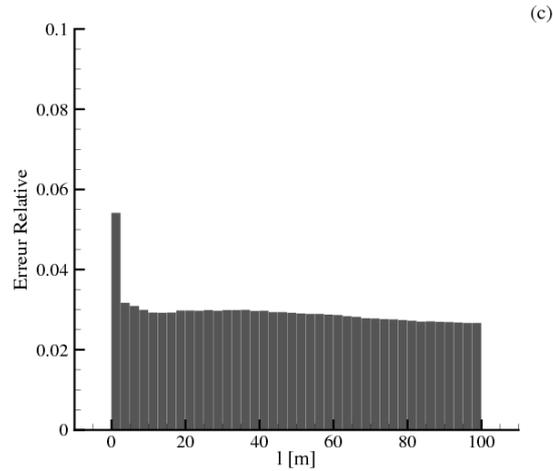


Figure 21 : Erreurs engendrées sur la transmittance moyenne de la couche d'air lorsque l'on fait varier (a) la température à laquelle émet le CN, (b) l'humidité relative et (c) l'épaisseur de la couche d'air traversée.

Atténuation du rayonnement dans le cadre de la MMC

En termes de luminance indépendamment de l'aspect spectral du rayonnement, l'atténuation d'un faisceau de quantas émis par une source située en $x=0$ et parcourant une distance x dans l'air atmosphérique de coefficient d'extinction moyen β se traduit par la relation de Beer-Lambert :

$$L(x) = L(0)\exp(-\beta x) \tag{50}$$

On considère que la luminance $L(0)$ est proportionnelle à Np , p étant la puissance élémentaire véhiculée par un quantum (ensemble de photons). La luminance à la distance x de la source vaut $n(x)p$ ou n est le nombre de quanta qui arrivent en x .

La loi macroscopique d'atténuation du rayonnement s'écrit alors :

$$n(x) = N\exp(-\beta x) \tag{51}$$

Le nombre de quanta éteints (absorbés ou/et diffusés) dans l'intervalle Δx au voisinage de x est :

$$\Delta n(x) = |-\beta N \exp(-\beta x) \Delta x| \quad (52)$$

La probabilité qu'un quantum soit éteint dans cet intervalle Δx est égal à la probabilité que s , longueur parcourue par le quantum avant extinction, soit comprise entre x et $x + \Delta x$, soit :

$$P(x \leq s \leq x + \Delta x) = \frac{\beta N \exp(-\beta x) \Delta x}{N} = \beta \exp(-\beta x) \Delta x \quad (53)$$

Par définition, la densité de probabilité est la limite de probabilité quand Δx tend vers zéro :

$$f_s(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x \leq s \leq x + \Delta x)}{\Delta x} = \beta \exp(-\beta x) \quad (54)$$

La fonction de répartition peut être alors déduite :

$$F_s(x) = \int_0^x f_s(x') dx' = 1 - \exp(-\beta x) \quad (55)$$

Ainsi, $F_s(x)$ est la fonction de répartition associée à la loi macroscopique d'atténuation prédisant aléatoirement la longueur de parcours d'un quantum avant extinction.

En inversant cette relation et en associant à F_s un nombre aléatoire R_s qui appartient à l'intervalle $[0 ; 1]$, on dispose d'un moyen de générer des distances parcourues qui, statistiquement, respectent la loi macroscopique.

$$s = -\frac{\ln R_s}{\beta} \quad (56)$$

Le coefficient d'extinction, d'après la loi de Kirchhoff est égal à : $\beta = 1 - \bar{\tau}$.

La procédure consiste à calculer la distance, l , entre le point d'émission du quantum et la cible (i.e. un site végétal, le sol ou la grande sphère qui englobe le domaine), puis le coefficient de transmission de l'air pour une teneur en eau correspondante et le coefficient d'extinction. Si la distance s générée aléatoirement est inférieure à la distance l alors le quantum est soit absorbé soit diffusé par la couche d'air. Dans le cas contraire, il atteint la cible. S'il atteint un site végétal, le quantum apporte sa contribution énergétique à ce site.

2.2.3 Cas d'étude

Le modèle de combustion a été appliqué tout d'abord à des configurations simples, sans vent ni pente, pour lesquelles la végétation est monodisperse et constituée de chêne kermès dont les propriétés géométriques et thermo-physiques sont rassemblées dans le Tableau 4.

La fraction volumique se déduit de la charge en éléments fins secs par unité de surface et de la masse volumique du combustible :

$$\alpha = \frac{V_k}{V} = \frac{m_{DFE}}{\rho_{DFE}V} = \frac{m''_{DFE}}{\rho_{DFE}H_{strate}} \quad (57)$$

et la profondeur de pénétration du rayonnement de la relation : $\delta = 4/\sigma_k\alpha$.

Dans le cas présent, $\alpha = 0.003$ et $\delta = 0.215\text{m}$, le pouvoir émissif de la flamme est de 68 kW/m^2 .

A l'instant initial, un site du réseau, ici le site 1225 (*Figure 22*), est en feu. Il préchauffe les sites voisins.

<i>Rapport surface volume des aiguilles</i>	σ_{DFP}	5950 m^{-1}
<i>Teneur en résidu charbonneux/en produits gazeux de pyrolyse</i>	ν_{char}/FPC_0	$0.30/0.7$
<i>Chaleur spécifique</i>	c_{pDFP}	$1470 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
<i>Hauteur de la strate végétale</i>	H	2.5 m
<i>Diamètre du site végétal</i>	D	2 m
<i>Masse volumique du combustible végétal</i>	ρ_{DFP}	480 kg m^{-3}
<i>Charge de combustible</i>	m''_{DFP}	3 kg m^{-2}
<i>Teneur en eau initiale du combustible végétal</i>	FMC_0	0.10
<i>Chaleur de combustion</i>	Δh_c	$16 \times 10^6 \text{ J.Kg}^{-1}$
<i>Fraction rayonnée</i>	χ_r	0.5
<i>Coefficient d'absorption de la flamme</i>	κ_{fl}	0.6
<i>Température de pyrolyse</i>	T_{pyr}	561 K
<i>Température d'inflammation</i>	T_{ign}	561 K
<i>Teneur critique en produits de pyrolyse</i>	FPC_{cr}	0
<i>Durée de combustion avec flamme ou temps de résidence de flamme</i>	t_c	30 s
<i>Température des braises</i>	T_b	1100 K
<i>Emissivité des braises</i>	ε_b	0.6
<i>Absorptivité du milieu végétal</i>	α	0.9

Tableau 4 : Propriétés géométriques et thermo-physiques du combustible végétal, ici de chêne kermès, et du milieu végétal.

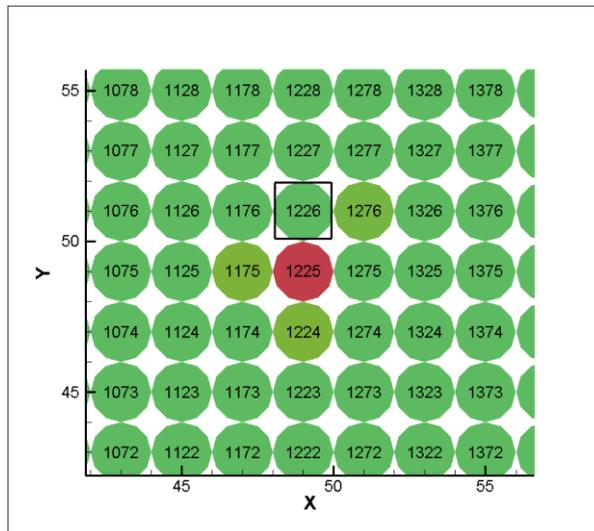


Figure 22 : Localisation du site en feu (n° 1225) et du site voisin (n° 1226).

Les évolutions temporelles de la température et de la teneur en eau du site 1226 sont données sur la Figure 23. On distingue clairement les quatre phases de la dégradation thermique. Après 36 secondes d'exposition, ce site est à la température d'inflammation fixée à 561 K et s'enflamme aussitôt. En absence de vent, seul le rayonnement de la flamme pilote la propagation du feu.

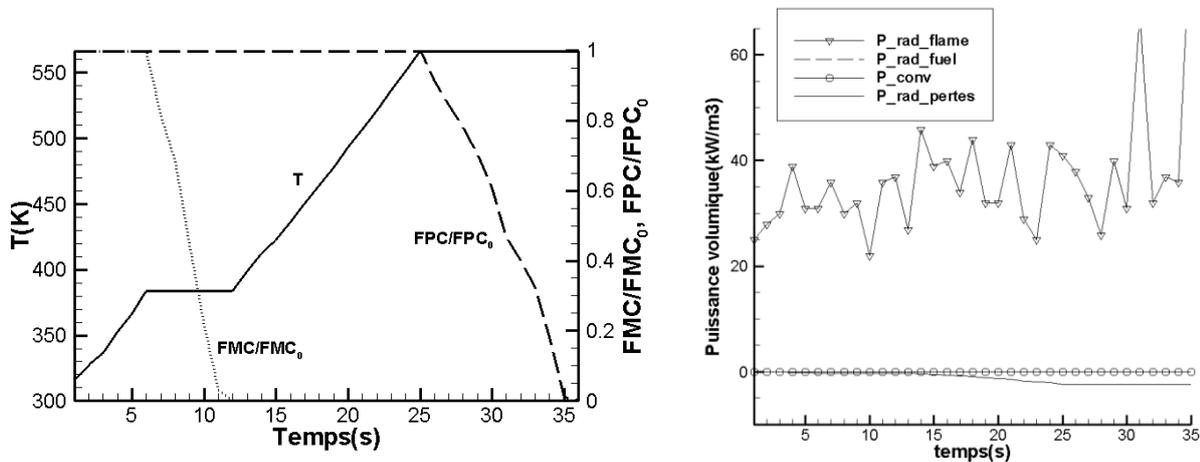


Figure 23 : Evolutions au cours du temps de la température et de la teneur en eau du site 1226, ainsi que des contributions des différents termes de l'équation de bilan d'énergie, en absence de vent.

En présence de vent, comme le montre la Figure 24 pour un vent de $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, le site 1226 s'enflamme après 16s d'exposition. Si, dans ce cas, le rayonnement reste prédominant, la convection contribue à la propagation du feu.

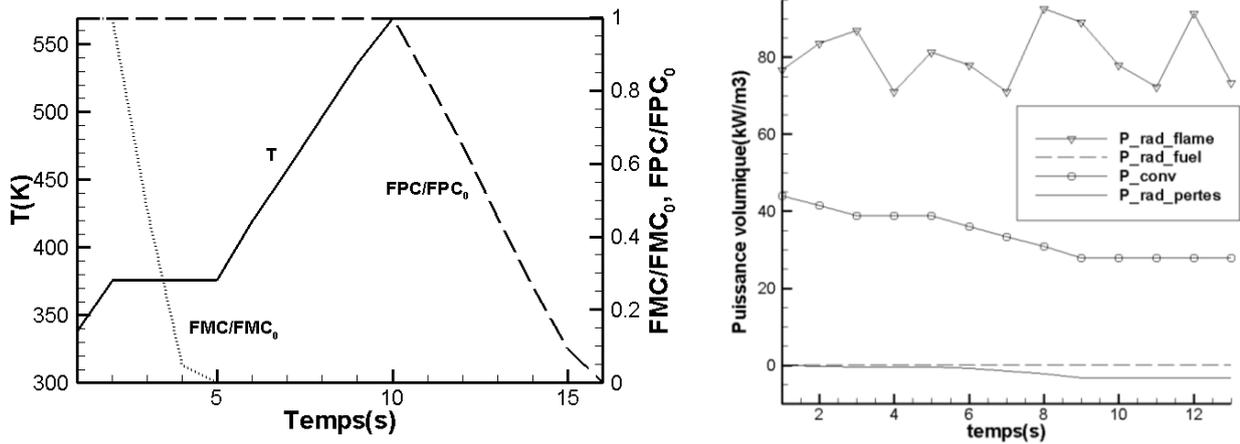


Figure 24. Evolution au cours du temps de la température et contributions des différents termes de l'équation de bilan d'énergie pour le site 1226. Le vent a une vitesse de 5 m.s^{-1} et souffle dans la direction Sud-Nord.

2.2.4 Allumage ponctuel et en ligne

L'allumage ponctuel correspond à l'inflammation d'un site du réseau. La flamme qui en résulte va préchauffer certains sites voisins et ce, pendant un temps t_c . Si aucun de ces sites ne s'enflamme, le feu ne se propagera pas.

Dans certaines situations, notamment lors de brûlages dirigés, l'allumage peut se faire en ligne. On le reproduit lors des simulations en enflammant une ou plusieurs rangées de sites du réseau. Le front est alors constitué d'un ensemble de flammes élémentaires qui collectivement vont propager le feu. La Figure 25 en est une illustration. Elle montre l'inflammation d'une dizaine de lignes de sites disposés régulièrement, puis la propagation ultérieure du feu sur un terrain plat avec et sans vent. Le réseau monodisperse, à l'exception de la zone d'allumage, est amorphe. Le taux de remplissage est de 50%.

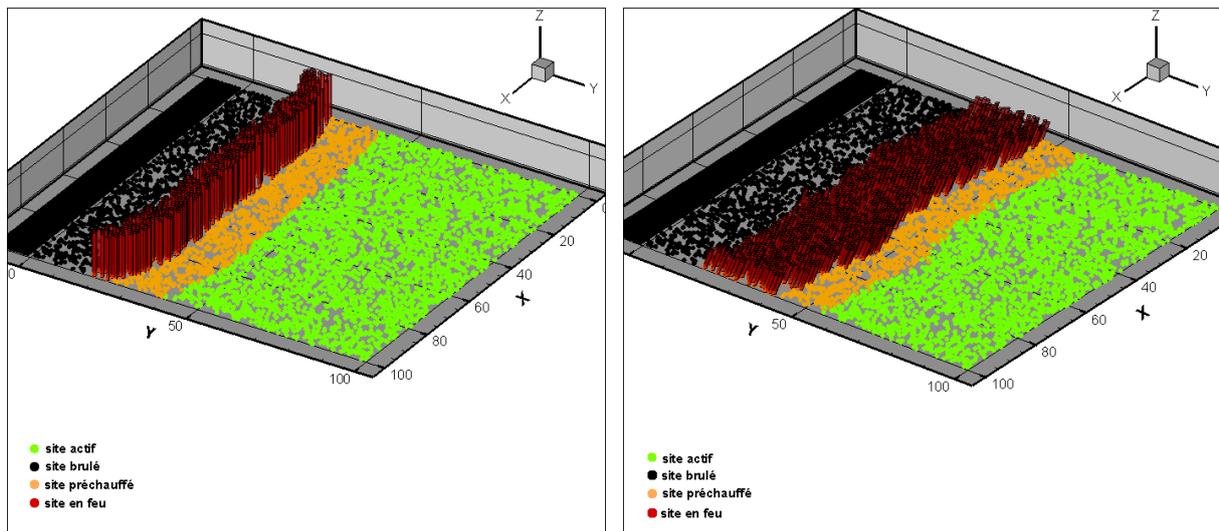


Figure 25: Propagation du feu sur un terrain plat (a) en absence de vent et (b) en présence d'un vent de 5m/s dans la direction Y. L'allumage est en ligne.

3 CAS D'ETUDE

3.1 Propagations isotropes et anisotropes

Le modèle de propagation est tout d'abord appliqué à des configurations simples pour lesquelles les effets dus au vent et/ou à la pente du terrain peuvent être évalués qualitativement. Les propriétés géométriques et thermo-physiques de la végétation, ici des arbustes de chêne kermès de 1 mètre de rayon, sont celles données dans le Tableau 4.

Propagation en absence de vent et sur terrain plat

Lorsqu'un feu se propage en absence de vent et sur terrain plat, le rayonnement est le mode de transfert de chaleur dominant, la convection étant négligeable. La Figure 26 montre quelques contours de feu après 200s de propagation sur des réseaux réguliers carrés et amorphes de différents dopages pour différentes valeurs de l'humidité relative de l'air atmosphérique. Le domaine étudié est de 100m×100m.

Sur réseaux réguliers dopés à 100% et pour des humidités relatives de l'air de 25 et 100% (Figure 26), on observe un contour circulaire qui traduit la nature isotrope de la propagation. Une

augmentation de l'humidité relative entraîne une diminution significative des surfaces brûlées et en feu.

Si la propagation se fait sur un réseau amorphe dopé à 50% avec HR=25% (*Figure 26c*), le contour de feu conserve un aspect circulaire, avec une vitesse de propagation plus faible que celle relevée sur réseau régulier pour la même humidité atmosphérique (*Figure 26a*). En revanche, lorsque le milieu environnant atténue fortement le rayonnement, la propagation est considérablement ralentie et le contour perd son aspect circulaire, comme c'est le cas sur la *Figure 26d* pour une humidité relative de 100%.

Le contour de feu représenté sur le diagramme e de la *Figure 26* correspond à un réseau dopé à 40% pour un air relativement sec (HR=25%). La propagation a là aussi considérablement ralenti et le contour de feu a perdu son aspect circulaire. Au voisinage du seuil de percolation ($p=0.3$ sur la *Figure 26f*), le feu n'a brûlé qu'une petite surface et après 200s de propagation, il ne reste qu'un seul site en feu. Quelques secondes après, le feu s'éteint.

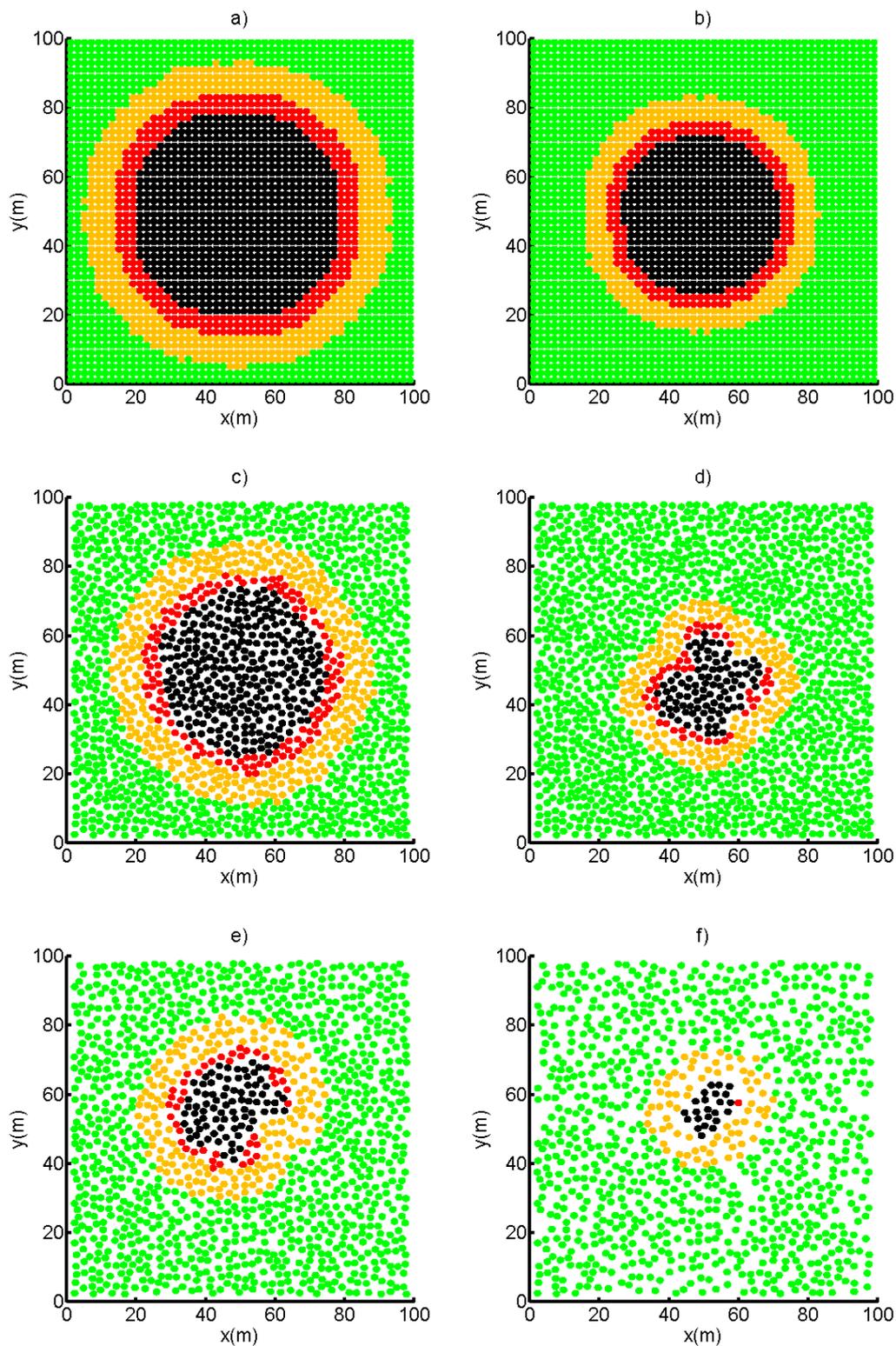


Figure 26 : Quelques exemples de contours de feu après 200s de propagation sur terrain plat et en absence de vent : réseaux réguliers carrés avec (a) $HR=25\%$ et (b) $HR=100\%$, réseaux amorphes de dopage 0.5 avec (c) $HR=25\%$ et (d) $HR=100\%$, et réseaux amorphes de dopages (e) 0.4 et (f) 0.3 avec $HR=25\%$. On distingue les sites intacts occupés (vert), les sites en feu (rouge) et les sites brûlés (noir). La température des sites de couleur orangée est comprise entre 310K et 1100K.

Propagation sur pente ascendante régulière ou/et en présence de vent

Les figures ci-dessous montrent les effets dus au vent et/ou à la pente sur les propriétés du feu, en termes de vitesse de propagation et de surface en feu.

En absence de vent et sur une pente ascendante, le feu se propage uniquement sous l'effet du rayonnement. Après la phase d'allumage ponctuel, la propagation de la tête de feu est quasi-stationnaire comme le montrent les évolutions au cours du temps de la position du front (Figure 27). Le nombre de sites en feu croît linéairement pour des pentes de 30 et 40°. Pour les pentes de 10 et 20°, la décroissance du nombre de sites en feu s'explique par le fait qu'après environ 250s, le feu ne peut plus se propager latéralement (Figure 27). La Figure 28 donnant la vitesse de propagation en fonction de l'angle de pente montre un comportement quadratique, conforme aux nombreuses données de la littérature (voir par exemple Mendes-Lopes et al. (2003) ou Tihay et al. (2012)).

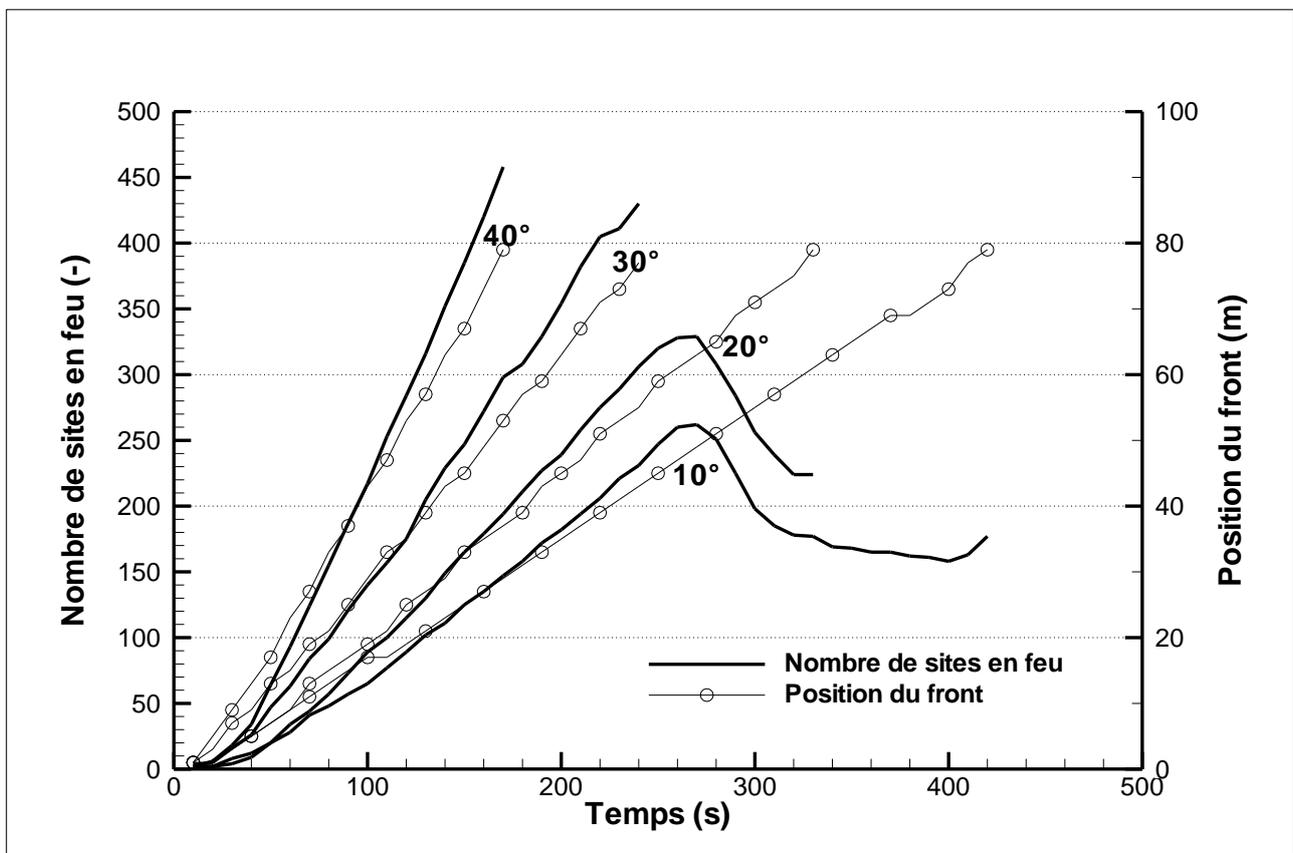


Figure 27 : Evolutions au cours du temps de la position de la tête de feu et du nombre de sites en feu.

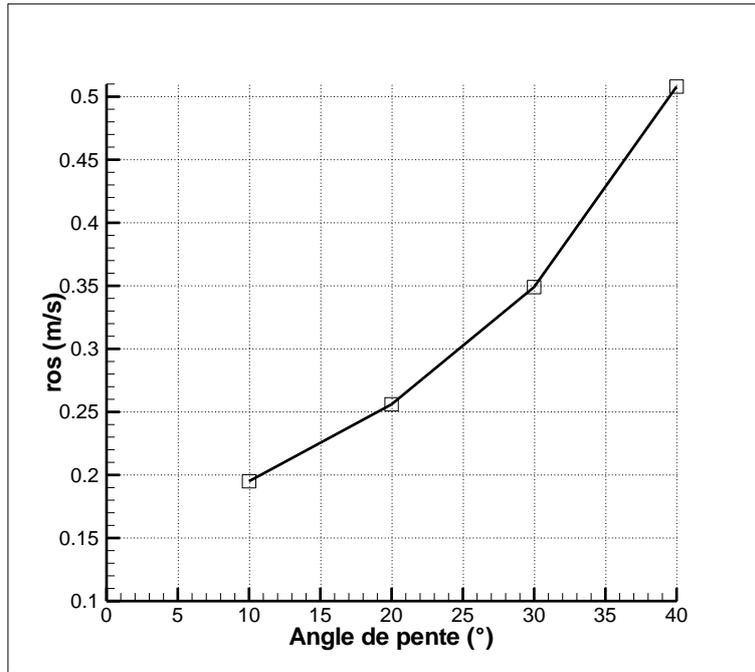


Figure 28 : Vitesse de propagation en fonction de l'angle de pente.

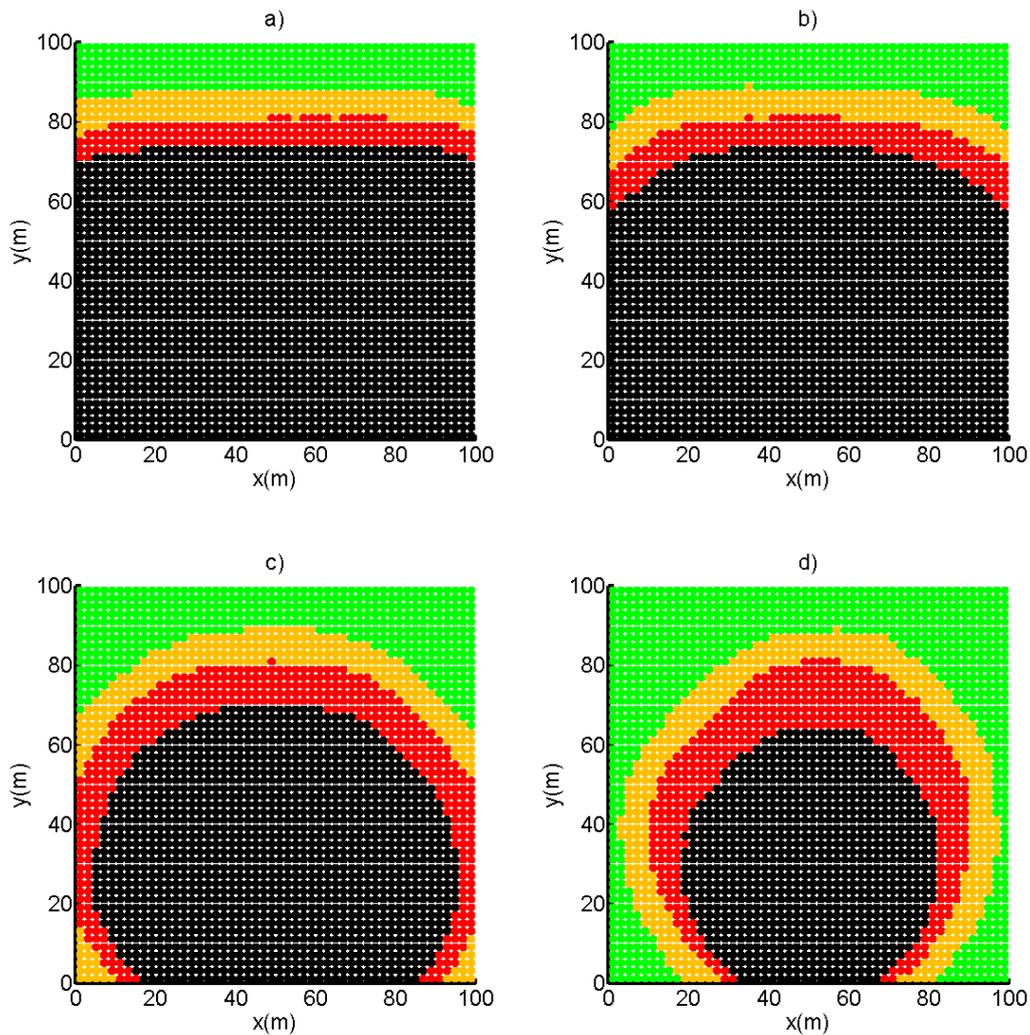


Figure 29 : Fronts de feu sur une pente ascendante de (a) 10° après 308s de propagation , (b) 20° après 234s de propagation, (c) 30° après 172s de propagation, et (d) 40° après 118s de propagation, en absence du vent, avec $HR=25\%$. Le réseau est régulier et dopé à 100%. On distingue les sites intacts occupés (vert), les sites en feu (rouge) et les sites brûlés (noir). La température des sites de couleur orangée est comprise entre 310K et 1100K.

Lorsque le feu se propage sur terrain plat, en présence d'un vent dont la direction est parallèle aux Y positifs (Figure 30a à Figure 30d), on observe un comportement sensiblement différent en raison de la convection. Le périmètre prend une forme elliptique, en raison des effets convectifs qui inclinent la flamme vers l'avant et transportent les gaz chauds au-delà du front de flammes, favorisant ainsi le préchauffage de la végétation.

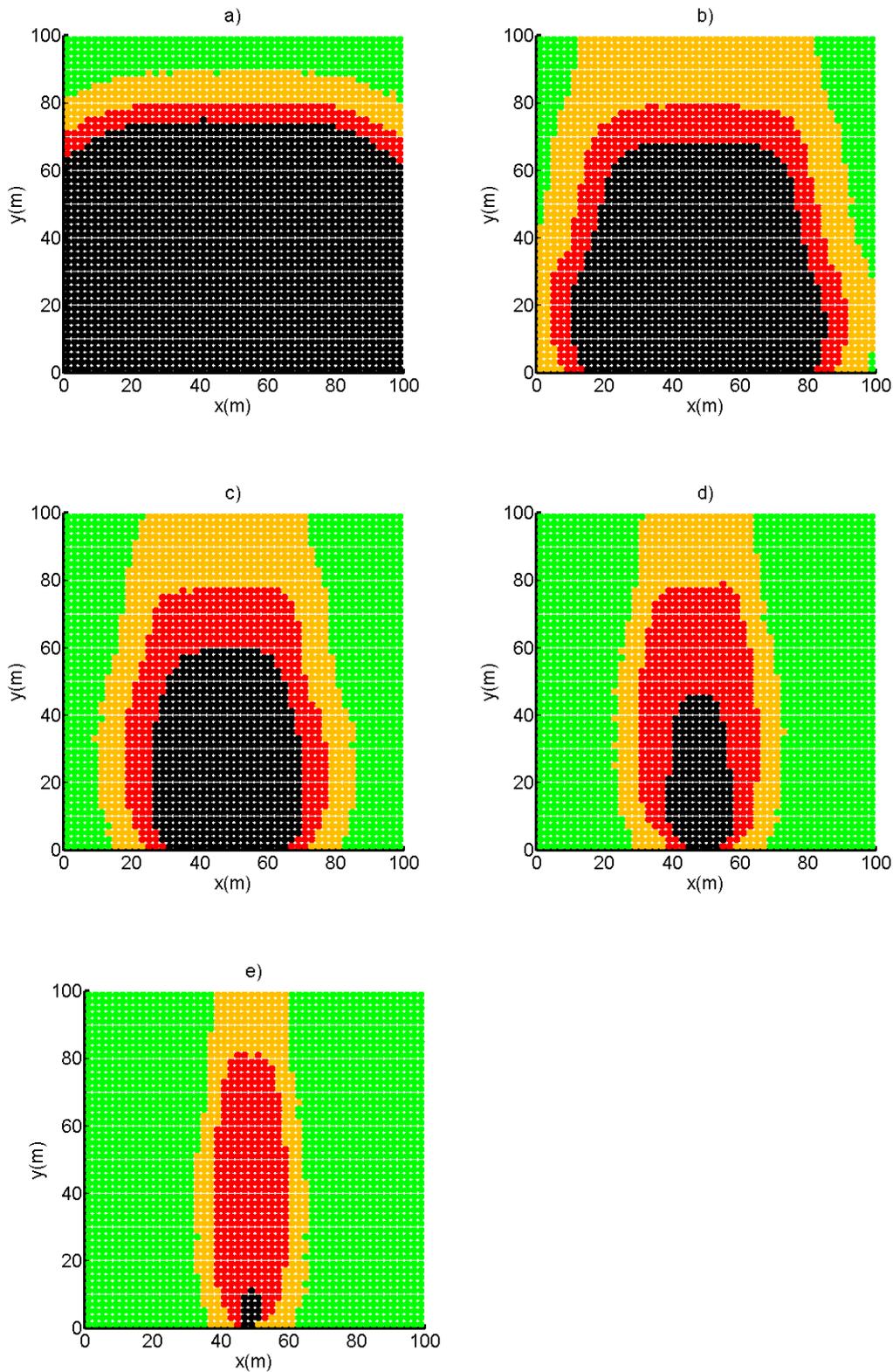


Figure 30 : Quelques exemples de contours de feu après propagation sur terrain plat (a) en absence de vent à $t= 470s$ et en présence d'un vent de (b) $1m/s$ à $t= 250s$, (c) $2m/s$ à $t= 160s$, (d) $4m/s$ à $t= 90s$ et (e) $6m/s$ à $t= 60s$. Le réseau est régulier et dopé à 100%. L'humidité relative de l'air est de 25%. On distingue les sites intacts occupés (vert), les sites en feu (rouge) et les sites brûlés (noir). La température des sites de couleur orangée est comprise entre 310K et 1100K.

La *Figure 31* montre l'évolution de la vitesse de propagation du feu (ros en m/s) en fonction de la vitesse du vent. La vitesse de propagation du feu a été calculée entre Y=20m et Y=80m.

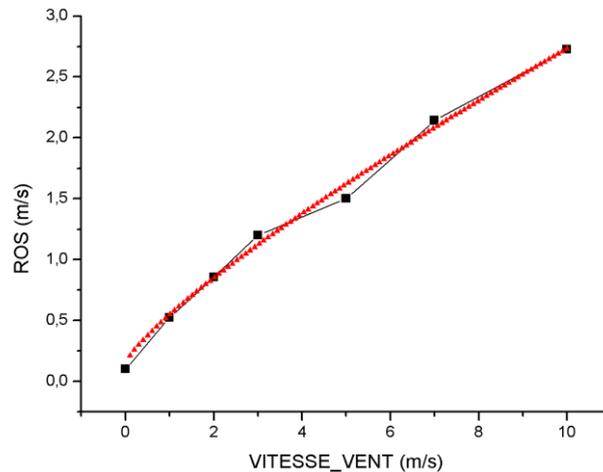


Figure 31 : Evolution du taux de propagation du feu en fonction de la vitesse du vent sur un réseau régulier 100m×100m pour une végétation de type chêne kermès. La courbe en rouge est une courbe de tendance d'équation : $ros = a + bU^c$.

Comme on peut le voir sur cette figure, cette courbe d'évolution suit une courbe de tendance dont l'équation, similaire à celle proposée par Rothermel (1972), s'écrit :

$$ros = ros_{U=0}(1 + aU^b) \quad (58)$$

où $ros_{U=0}$ (ms^{-1}) est la vitesse de propagation du feu pour une vitesse de vent nulle, a ($m^{-1}s$) est une constante et b est un exposant qui dépend de la nature du végétal.

Dans le cas présent, on obtient l'équation suivante :

$$ros = 0.207 (1 + 0.082 U^{1.55}) \quad (59)$$

La *Figure 32* illustre les effets combinés du vent et de la pente. Le caractère elliptique du front s'estompe et la tête de feu s'élargit.

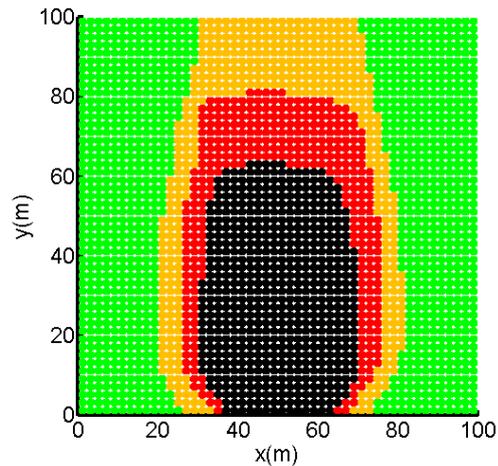


Figure 32 : Front de feu sur une pente ascendante de 20° en présence d'un vent de 3m/s dans la direction des Y positifs après 151s de propagation, avec HR=25%. Le réseau est régulier et dopé à 100%. On distingue les sites intacts occupés (vert), les sites en feu (rouge) et les sites brûlés (noir). La température des sites de couleur orangée est comprise entre 310K et 1100K.

3.2 Seuil de percolation

La détermination du seuil de percolation est capitale dans la prévention des incendies de forêts et l'aménagement d'ouvrages de défense. Il est ici défini comme le taux de remplissage critique pour lequel les fluctuations du temps moyen de propagation sont maximales. L'exemple donné sur la *Figure 33* correspond à des propagations sur un terrain plat en présence d'un vent fort sur réseau amorphe.

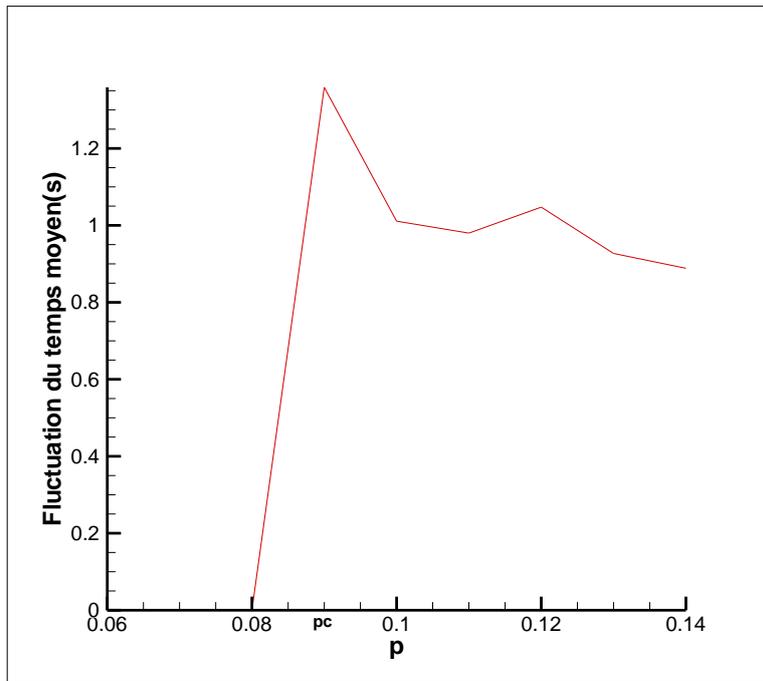


Figure 33 : Fluctuations du temps moyen de propagation d'un ensemble de 100 feux. Le réseau est amorphe et constitué d'éléments de végétation de 1m de rayon. L'allumage est ponctuel.

Dans l'exemple de la *Figure 34a*, le feu se propage sur terrain plat, en présence d'un vent de 12m/s, dans une végétation composée d'*Arbustus Unedo*. Le dopage ou taux de couverture végétale est de 0.33. Les autres données sont rassemblées dans le Tableau 5. La plupart sont issues des travaux de Santoni et al. (2011). Le dopage de 0.33 étant très proche du seuil de percolation, on observe des effets de « petit monde » marqués, comme l'apparition d'amas, de lacunarités et de digitation.

<i>Rapport surface volume des aiguilles</i>	σ_{DFP}	5544 m^{-1}
<i>Teneur en résidu carbonneux/en produits gazeux de pyrolyse</i>	v_{char}/FPC_0	0.3/0.7
<i>Chaleur spécifique</i>	$c_{p_{DFP}}$	$1470 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
<i>Hauteur de la litière</i>	H	3 m
<i>Diamètre du site végétal</i>	D	3 m
<i>Densité du combustible végétal</i>	ρ_{DFP}	720 kg m^{-3}

<i>Charge de combustible</i>	m''_{DFP}	4.32 kg m^{-2}
<i>Teneur en eau initiale du combustible végétal</i>	FMC_0	0.20
<i>Chaleur de combustion</i>	Δh_c	$16 \times 10^6 \text{ J. kg}^{-1}$
<i>Fraction rayonnée</i>	χ_R	0.5
<i>Coefficient d'absorption de la flamme</i>	κ_{fl}	0.4
<i>Température de pyrolyse</i>	T_{pyr}	$500K$
<i>Température d'inflammation</i>	T_{ign}	$500K$
<i>Teneur critique en produits de pyrolyse</i>	FPC_{cr}	0
<i>Temps de résidence de flamme</i>	t_c	30 s
<i>Température des braises</i>	T_b	1100 K
<i>Emissivité des braises</i>	ε_b	0.9
<i>Absorptivité du milieu végétal</i>	a	0.9
<i>Humidité relative de l'air (%)</i>	HR	30

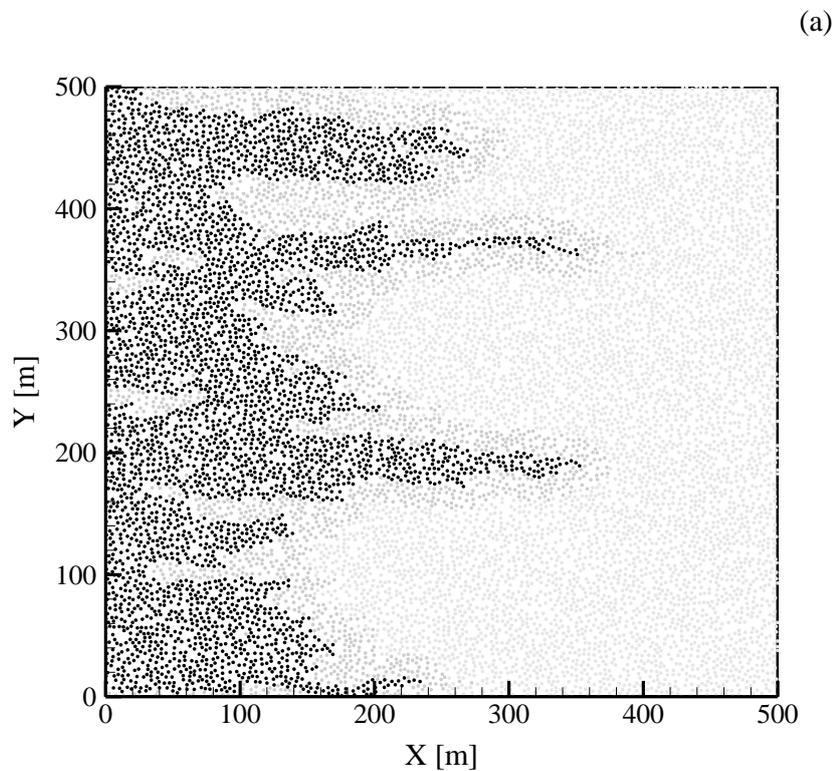
Tableau 5 : Propriétés géométriques et thermo-physiques du combustible végétal, ici les éléments fins d'Arbustus Unedo, et du milieu végétal (Santoni et al., 2011). Dans ce cas, $\alpha = 0.002$ et $\delta = 0.36m$. Le pouvoir émissif de la flamme est de 85 kW/m^2 .

Le seuil de percolation dépend des paramètres liés à la végétation, aux conditions météorologiques et à la topographie du terrain. La vitesse du vent peut affecter significativement ce seuil, comme l'illustre la Figure 34b où sont tracés les évolutions de la surface brûlée adimensionnée (*i.e.*, le rapport du nombre de sites brûlés sur le nombre total de sites) et le temps de propagation en fonction du dopage pour différentes vitesses de vent, 0, 6 et 12m/s. Quelle que soit la vitesse du vent, on constate un comportement similaire au voisinage du seuil. On notera que le seuil de percolation coïncide également avec le point d'inflexion de la courbe de la surface brûlée.

3.3 Etude de sensibilité

L'analyse de sensibilité est un outil précieux dans le développement et l'utilisation d'un modèle. Elle permet notamment d'identifier et de hiérarchiser les paramètres influents du modèle et, par là même, d'orienter les efforts de recherche et de développement.

L'étude de la sensibilité d'un modèle numérique a longtems reposé sur l'évaluation des répercussions sur les réponses (valeurs en sortie) de petites perturbations des facteurs (valeurs des entrées), et ce autour d'un point nominal. Cette approche déterministe consiste à calculer ou à estimer des indices basés sur les dérivées partielles du modèle en un point précis.



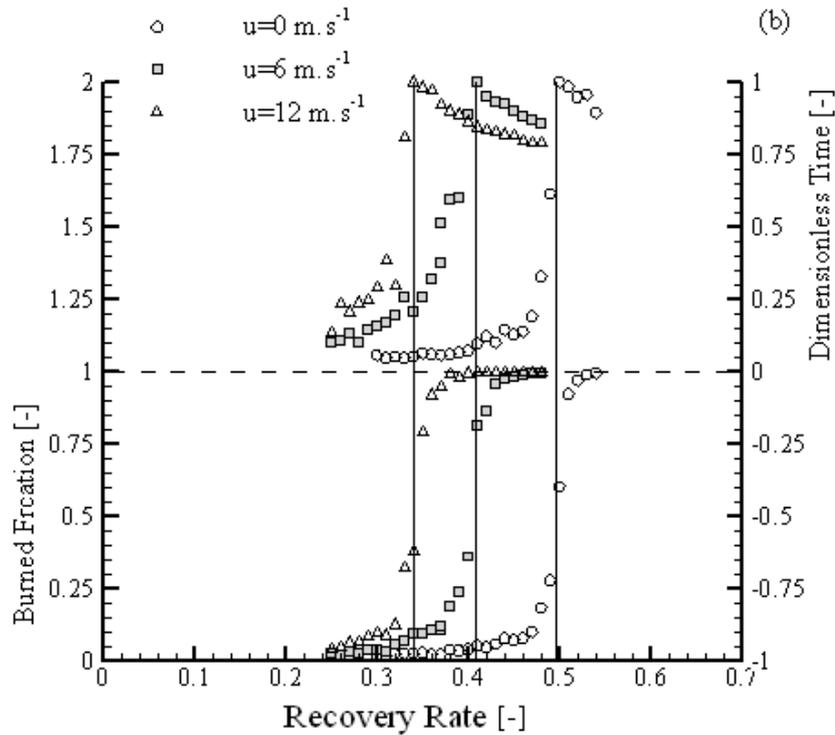


Figure 34 : (a) Contour final du feu après propagation sur un terrain plat et en présence d'un vent de 12m/s. L'allumage en ligne a été initié sur le côté droit d'un réseau amorphe de 500×500 m dopé à 33%. (b) Evolutions de la surface brûlée adimensionnée et du temps de propagation en fonction du dopage pour des vitesses de vent de 0, 6 et 12 m/s. La ligne verticale correspond au seuil de percolation.

A partir de la fin des années 80, pour pallier les limites des méthodes locales (hypothèses de linéarité et de normalité, variations locales), une nouvelle génération de méthodes s'est développée dans un cadre statistique. Par opposition aux méthodes locales, elles ont été nommées « globales » car elles s'intéressent au domaine de variation possible des variables d'entrée (Saltelli et al. ,2010). Celles-ci suscitent un intérêt croissant de la part des modélisateurs et des utilisateurs de modèles numériques, qui souhaitent profiter pleinement des outils de simulation numérique. Leurs objectifs peuvent aller de l'identification et la hiérarchisation des entrées les plus influentes, à la détermination des entrées non influentes afin de les rendre constantes, en passant par la calibration des variables du modèle par rapport à certaines informations disponibles (observations réelles de la sortie, contraintes).

Parmi ces méthodes dites globales, il existe les méthodes issues de la théorie classique des plans d'expériences (Montgomery, 2004 ; Driesbecke et al. ,1998). Un plan factoriel complet consiste à

évaluer le code de calcul pour toutes les combinaisons des niveaux des entrées, ce qui permet l'estimation de tous les effets des entrées et de leurs interactions. En pratique, cela nécessite un grand nombre de simulations, ce qui rend ce plan impraticable au-delà d'une dizaine d'entrées. En effet, il nécessite 2^d calculs, d étant le nombre d'entrées si on suppose que le modèle est monotone en travaillant avec deux niveaux (*i.e.* 2 valeurs distinctes) pour chaque entrée.

Dans ce contexte, on cherche, d'une part, la réponse à la question fondamentale suivante : « quelles sont les variables d'entrée du modèle qui contribuent le plus à une quantité d'intérêt calculée à l'aide de ce modèle? », de façon à orienter les efforts sur la détermination des paramètres d'entrée qui ont le plus d'effet, et, d'autre part, à hiérarchiser les paramètres selon leur sensibilité sur la réponse et de mieux comprendre les mécanismes qui régissent la propagation du feu de végétation.

Le scénario retenu est celui d'un feu se propageant, en présence d'un vent dirigé dans la direction des Y positifs, sur un terrain plat et dans une végétation homogène de chêne kermès répartie sur un réseau régulier (voir le tableau 5). Le domaine a pour dimensions 100m×100m et l'allumage est ponctuel, en (X=49m ; Y=1m).

En ce qui concerne les facteurs, nous nous sommes limités à six et nous avons choisi ceux qui présentent la plus grande variabilité dans la littérature et/ou des incertitudes lors de leur détermination expérimentale.

Ces six paramètres sont :

- La charge sèche des éléments végétaux fins,
- Le temps de résidence de la flamme,
- La fraction rayonnée de la chaleur dégagée par pyrolyse,
- La teneur en eau initiale du végétal,
- La température d'inflammation, et
- La vitesse du vent.

Dans le cas présent, la réponse retenue est la vitesse de propagation du feu entre les points A et B du domaine, situés respectivement sur les lignes $Y=20m$ et $Y=80m$.

Facteur	Niveau de référence	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
Charge sèche du végétal $m_{DF}''(kg.m^{-2})$	3.0	2.5	3.5
Temps de résidence de flamme $t_c(s)$	30	27	33
Teneur en eau initiale du végétal $FMC_0(-)$	0.2	0.16	0.24
Température d'allumage $T_{ign}(K)$	550	540	560
Fraction rayonnée $\chi_r(-)$	0.5	0.45	0.55
Vitesse du vent $U(m.s^{-1})$	5	4	6

Tableau 6 : Analyse de sensibilité : niveau de référence, niveaux bas et haut des différents facteurs.

L'analyse de sensibilité repose sur un plan factoriel complet qui consiste à introduire, pour chacun des six facteurs, un niveau bas et un niveau haut par rapport à un niveau de référence (Tableau 6), ce qui revient à effectuer 64 simulations. Il est important qu'il y ait propagation pour tous les essais. Dans le cas contraire, il convient de réduire la gamme de variations d'un ou plusieurs facteurs.

Les résultats de l'analyse sont présentés sous la forme d'un diagramme de Pareto. Le diagramme donné sur la Figure 35 montre combien les facteurs et leurs interactions peuvent influencer sur la vitesse de propagation.

La vitesse de propagation est principalement influencée par les paramètres principaux, dans l'ordre, par la vitesse du vent (facteur F), la charge en éléments fins secs (A), le temps de résidence de la flamme (B), la fraction rayonnée (C), la teneur en eau initiale de ces éléments fins secs (D), la température d'inflammation (E). Viennent ensuite les effets d'ordre 2 que sont l'interaction AF, entre la charge et le vent, et l'interaction BF, entre le temps de combustion et le vent. Les interactions d'ordre 3 ont un effet négligeable.

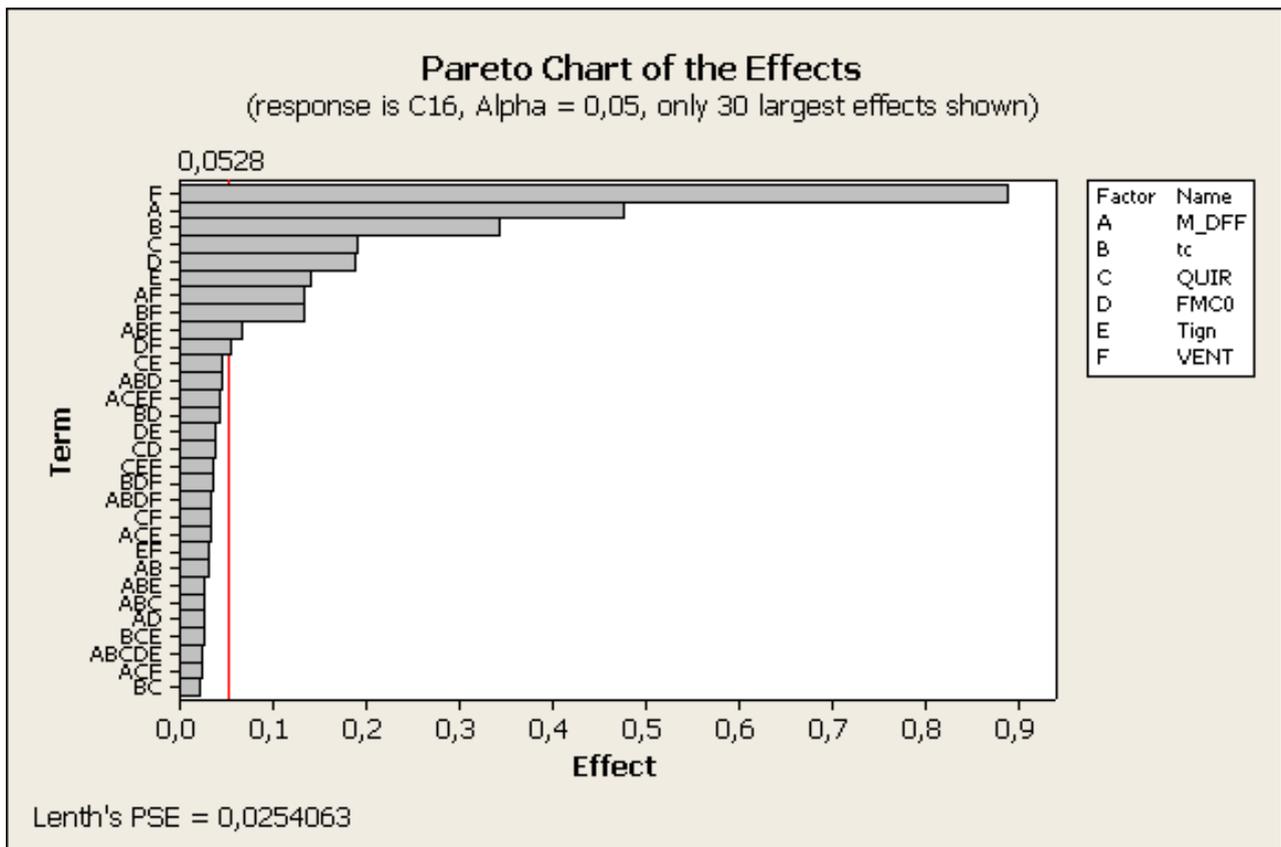


Figure 35 : Analyse de sensibilité : diagramme de Pareto permettant de hiérarchiser les facteurs influents et leurs interactions en fonction des effets produits sur la vitesse de propagation du feu.

L'impact, positif ou négatif, des facteurs principaux sur la vitesse de propagation peut être évalué à partir de la Figure 36.

Certains résultats sont prévisibles, comme l'augmentation de la vitesse de propagation lorsque la charge, le vent ou la fraction rayonnée augmentent ou lorsque la teneur en eau ou la température d'inflammation diminuent, l'impact négatif du temps de résidence de flamme ne l'est pas vraiment (Figure 36). Cela résulte d'une hypothèse du modèle qui consiste à calculer la puissance dégagée par la combustion \dot{Q} en supposant que le débit de pyrolyse est relié à la masse par unité de surface des éléments fins secs et au temps de combustion avec flamme par: $\dot{m}_{DF}'' = m_{DF}''/t_c$. De sorte que, si l'on augmente t_c , pour une même masse de combustible, le débit de pyrolyse diminue et donc la puissance dégagée.

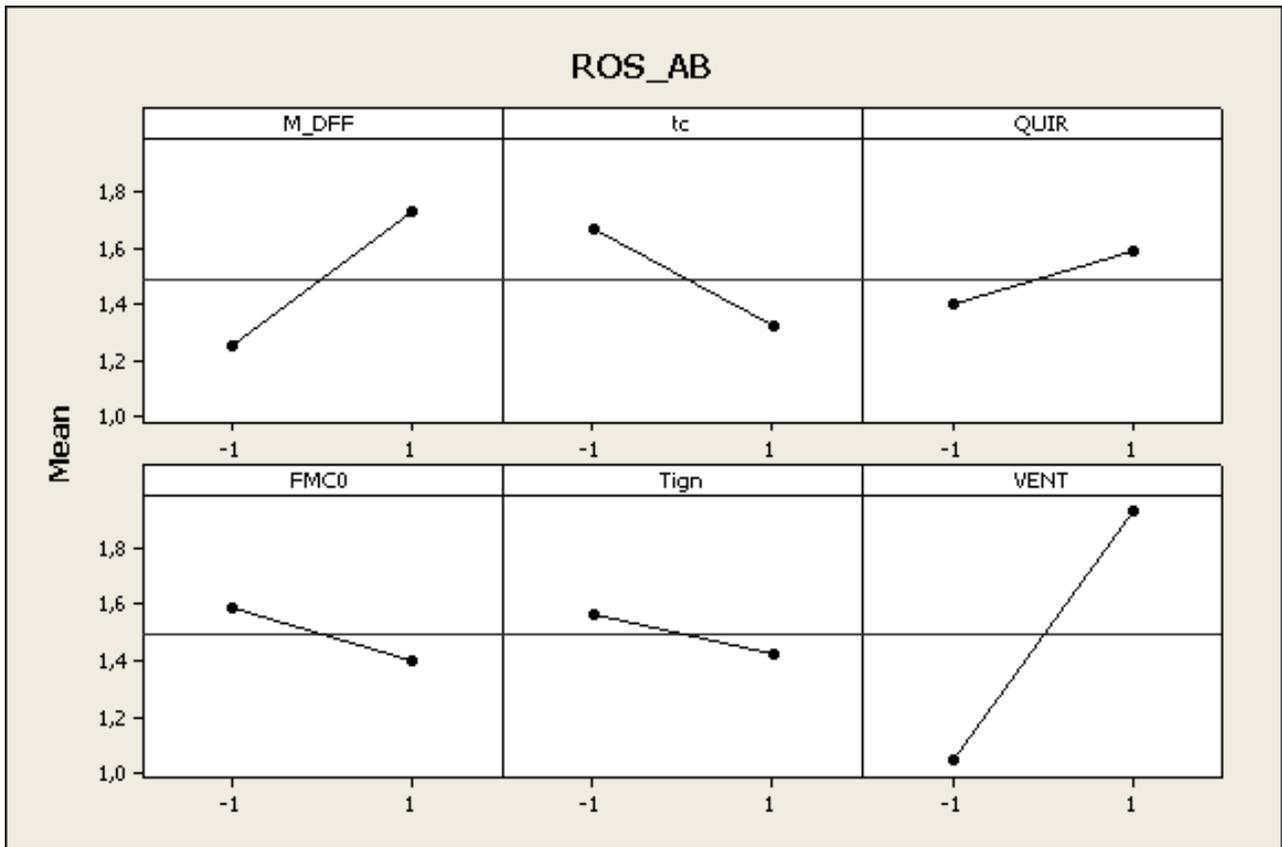


Figure 36 : Analyse de sensibilité : diagramme des effets principaux sur la vitesse de propagation.

Relation entre la vitesse de propagation et les facteurs principaux

Il est possible à partir de l'analyse de sensibilité de corréler la vitesse de propagation du feu aux facteurs principaux et à leurs interactions, mais aussi d'estimer les erreurs commises en négligeant les interactions d'ordre deux et plus.

La vitesse de propagation s'écrit en fonction des 6 facteurs retenus:

$$ros = \beta_0 + \underbrace{\sum_{i=1}^6 \beta_i X_i}_{\substack{\text{effets} \\ \text{principaux} \\ \text{d'ordre 1}}} + \underbrace{\sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \beta_{ij} X_i X_j}_{\substack{\text{interactions} \\ \text{d'ordre 2}}}$$

$$\begin{aligned}
& + \underbrace{\sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \sum_{k>j} \beta_{ijk} X_i X_j X_k}_{\text{interactions d'ordre 3}} \\
& + \underbrace{\sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \sum_{k>j} \sum_{l>k} \beta_{ijkl} X_i X_j X_k X_l}_{\text{interactions d'ordre 4}} \\
& + \underbrace{\sum_{i=1}^6 \sum_{j>i} \sum_{k>j} \sum_{l>k} \sum_{m>l} \beta_{ijklm} X_i X_j X_k X_l X_m}_{\text{interactions d'ordre 5}} \\
& + \underbrace{\beta_{123456} X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6}_{\text{interactions d'ordre 6}} \tag{60}
\end{aligned}$$

où X_i est le facteur i , avec $1 \leq i \leq 6$. Le terme β_0 représente la vitesse de propagation obtenue par la simulation en utilisant les valeurs de référence pour l'ensemble des facteurs.

Nous pouvons appliquer la formule générale des plans factoriels à chacune des 64 simulations. Nous obtenons ainsi un système de 64 équations à 64 inconnues qui, compte tenu des niveaux (+1 ou -1) que prend chacun des facteurs, s'écrit:

$$ros = M(\beta) \tag{61}$$

Où (β) est le vecteur colonne des coefficients, M la matrice des niveaux et ros le vecteur colonne contenant les vitesses de propagation obtenues à l'issue des 64 simulations.

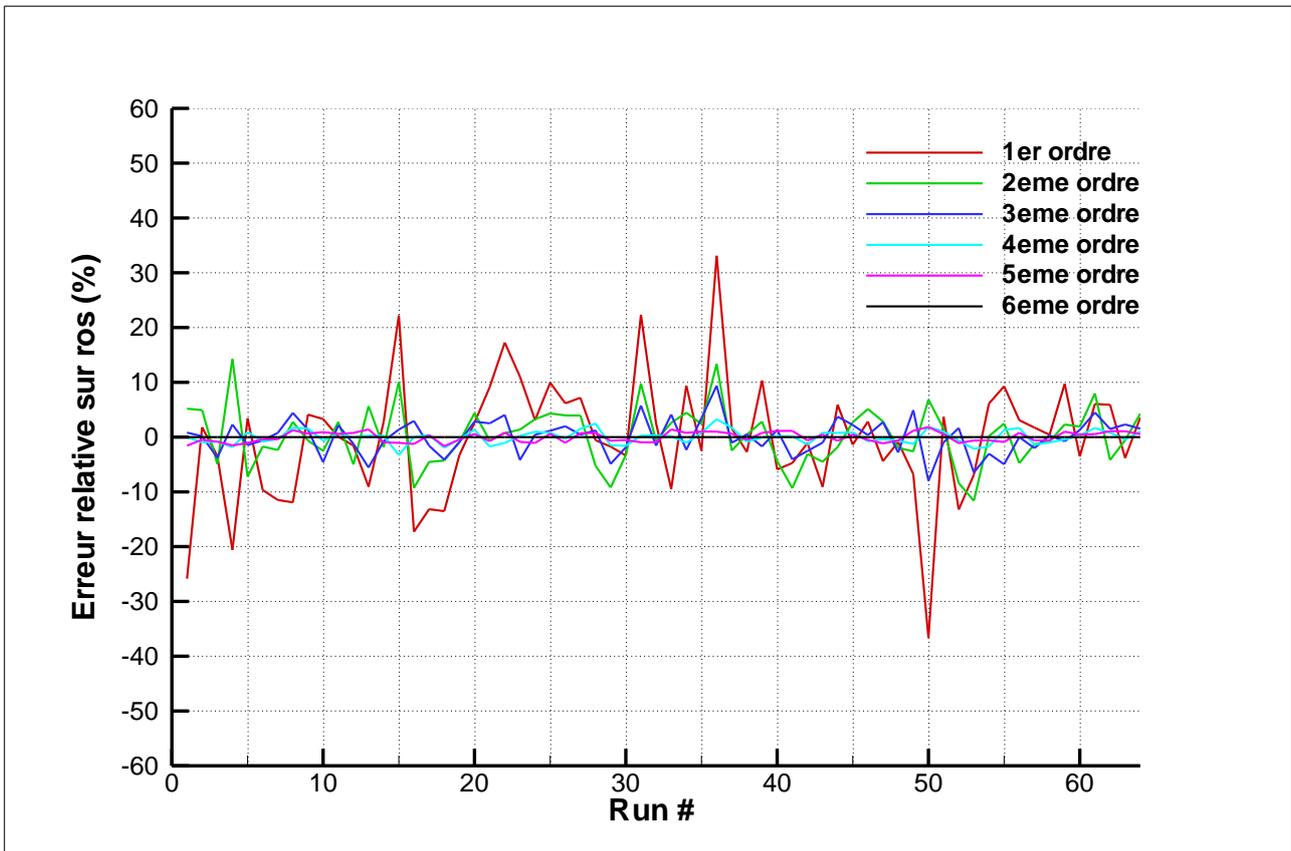


Figure 37 : Graphe montrant, pour l'ensemble des 64 essais, l'erreur relative entre la vitesse de propagation approchée à différents ordres et la vitesse de propagation calculée par le modèle.

Après avoir déterminé les coefficients β , une erreur relative est calculée pour chaque essai, traduisant l'écart entre la vitesse de propagation obtenue en résolvant l'équation ci-dessus de l'ordre 1 jusqu'à l'ordre 6 et la vitesse de propagation obtenue par la simulation.

Le graphe de la figure 37 montre l'erreur relative évaluée pour chaque essai.

Au premier ordre, l'écart entre la valeur approchée à l'ordre 1 et celle calculée par le modèle dépasse les 20%. Dès l'ordre 2, l'écart se réduit à environ 5%. Dès le quatrième ordre, cet écart est vraiment minime ($\leq 2\%$) et pour des ordres plus élevés, il devient négligeable.

Si l'on néglige les termes d'ordre 2 et plus, la vitesse de propagation du feu s'exprime en fonction des facteurs retenus comme suit :

$$\begin{aligned}
\overline{ros}_1 = & 1.4907 + \frac{0.2388}{0.5} (m''_{DWF} - 3) - \frac{0.1716}{3} (t_c - 30) \\
& + \frac{0.0955}{0.05} (\chi_r - 0.5) \\
& - \frac{0.0939}{0.04} (FMC_0 - 0.2) - \frac{0.0707}{10} (T_{ign} - 550) \\
& + \frac{0.444}{1} (U - 5)
\end{aligned} \tag{62}$$

En prenant également les interactions d'ordre 2, elle devient :

$$\begin{aligned}
\overline{ros}_2 = & \overline{ros}_1 - \frac{0.0152}{(0.5 \times 3)} (m''_{DWF} - 3)(t_c - 30) + \frac{0.0037}{(0.5 \times 0.05)} (m''_{DWF} - 3)(\chi_r - 0.5) \\
& - \frac{0.013}{(0.5 \times 0.04)} (m''_{DWF} - 3)(FMC_0 - 0.2) - \frac{0.0071}{(0.5 \times 10)} (m''_{DWF} - 3)(T_{ign} - 550) \\
& + \frac{0.0667}{(0.5 \times 1)} (m''_{DWF} - 3)(U - 5) + \frac{0.0112}{(3 \times 0.05)} (t_c - 30)(\chi_r - 0.5) \\
& + \frac{0.0213}{(3 \times 0.04)} (t_c - 30)(FMC_0 - 0.2) + \frac{0.0028}{(3 \times 10)} (t_c - 30)(T_{ign} - 550) \\
& - \frac{0.0665}{(3 \times 1)} (t_c - 30)(U - 5) - \frac{0.0188}{(0.05 \times 0.04)} (\chi_r - 0.5)(FMC_0 - 0.2) \\
& + \frac{0.023}{(0.05 \times 10)} (\chi_r - 0.5)(T_{ign} - 550) + \frac{0.0166}{(0.05 \times 1)} (\chi_r - 0.5)(U - 5) \\
& + \frac{0.0191}{(0.04 \times 10)} (FMC_0 - 0.2)(T_{ign} - 550) - \frac{0.027}{(0.04 \times 1)} (FMC_0 - 0.2)(U - 5) \\
& - \frac{0.0152}{(10 \times 1)} (T_{ign} - 550)(U - 5)
\end{aligned} \tag{63}$$

Cette relation permet donc d'estimer à 5 % près la vitesse de propagation du feu en fonction de la vitesse de référence et des six facteurs retenus.

Des corrélations donnant les surfaces brûlée et en feu en fonction des facteurs retenus peuvent être également obtenues en procédant de manière analogue. Les simulations que nous avons réalisées sur un domaine de 100m×100m ont conduit à des aberrations, en raison d'un effet de taille marqué.

L'une des perspectives de ce travail est de conduire une étude de sensibilité complète sur un domaine beaucoup plus étendu, comme 1000m×1000m.

4 VALIDATION DU MODELE DE PROPAGATION

La validation du modèle a consisté à confronter les résultats du modèle aux mesures effectuées lors d'un brûlage dirigé et d'un feu réel passé.

4.1 Validation sur un brûlage dirigé

Les expériences ont été conduites sur un terrain plat de 2500 ha situé dans le Territoire du Nord Australien en juillet et août 1986 (Cheney et al., 1993 ; Cheney and Gould, 1995). La végétation, à dominante d'herbacées, est homogène et continue. Le terrain a été divisé en 170 domaines de dimensions 100m x 100m, 200m x 200m et 200m x 300m. Plus de 121 domaines ont été utilisés par Cheney et al. (1993) afin d'étudier l'influence du combustible végétal et du vent sur la vitesse de propagation de la tête du feu.

Deux types d'herbacées étaient présentes sur le terrain : *Eriachne burkittii* (« kérosène bush »), une herbe courte avec un rapport surface/volume de 9770 m^{-1} , et *Themeda australis* (« Kangaroo grass »), une herbe plus fine avec un rapport surface/volume de 12240 m^{-1} . Pour déterminer la hauteur de strate, la charge, la densité et la teneur en eau du combustible végétal, la végétation a été prélevée à divers emplacements du terrain judicieusement choisis. La direction et la vitesse du vent ont été mesurées aux coins gauches de chaque domaine à une hauteur de 2m au-dessus du sol et à mi-hauteur de la flamme, à intervalle de temps de 5 secondes durant le feu.

Le domaine F19, de dimensions 200m x 200m, a été retenu en raison de la présence exclusive de *Themeda australis*, dont les propriétés sont regroupées dans le *Tableau 7*. En ce qui concerne l'allumage, deux pompiers partent 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 secondes. Ils allument à l'aide de chalumeaux toute la surface qu'ils parcourent, soit 175m×3.3m.

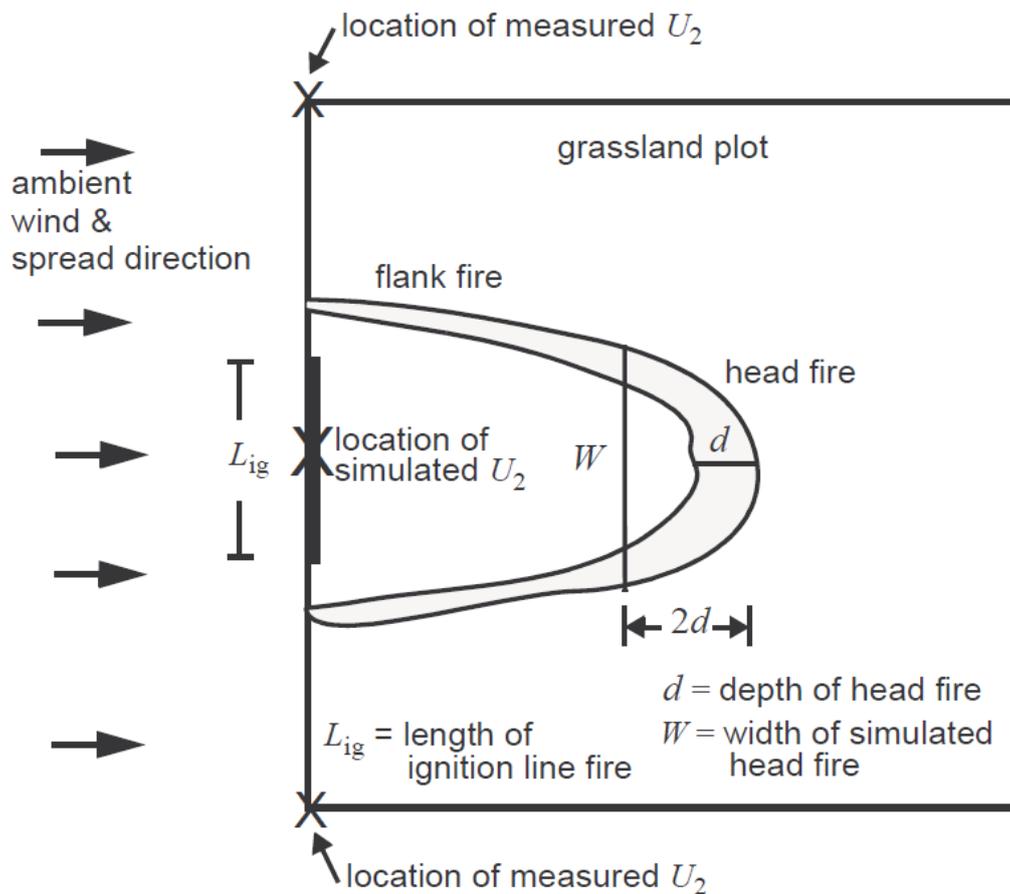


Figure 38 : Expérience F19 : Représentation schématique des conditions d'allumage et du front du feu (Mell et al., 2004).

La végétation continue et homogène est représentée par un réseau de sites réguliers de dopage 1. Chaque site est représenté par un cylindre de 1.5m de rayon, ce qui donne, d'après Heskestad (1983), une hauteur de flamme de 2.6m, comme celle observée expérimentalement lors du brûlage F19.

Les propriétés géométriques et thermo-physiques du végétal sont données dans le *Tableau 7*, les conditions météorologiques dans le *Tableau 8*. Les données déterminées expérimentalement par Cheney et al. (1993) sont utilisées, les autres sont issues de la littérature.

GRANDEUR PHYSIQUE	SYMBOLE, UNITE	VALEUR	SOURCE
<i>Rapport surface volume</i>	σ_k, m^{-1}	12240	(Cheney et al., 1993)
<i>Teneur en résidu charbonneux en produits gazeux de pyrolyse</i>	v_{char}/FPC_0	0.20/0.80	(Sussot ,1982)
<i>Chaleur spécifique</i>	$c_{p,k}, J kg^{-1} K^{-1}$	1110+3.7*T	(Parker, 1988)
<i>Hauteur de la strate</i>	H, m	0.51	(Cheney et al., 1993)
<i>Masse volumique</i>	$\rho_k, kg m^{-3}$	512	(Rothermel,1972)
<i>Charge sèche</i>	$m''_{DFP}, kg m^{-2}$	0.313	(Cheney et al., 1993)
<i>Compacité</i>	α_k	0.0012	(Cheney et al., 1993)
<i>Teneur en eau</i>	FMC_0	0.058	(Cheney et al., 1993)
<i>Température de pyrolyse</i>	T_{pyr}, K	500	(Koo et al., 2005)
<i>Température d'inflammation</i>	T_{inf}, K	500	(Koo et al., 2005)
<i>Teneur critique en produits de pyrolyse</i>	FPC_{cr}	0	Présente étude
<i>Fraction rayonnée</i>	χ_r	0.35	(Quintiere ,1997)
<i>Chaleur de combustion</i>	$\Delta h_{comb}, J \cdot kg^{-1}$	15.6×10^6	(Sussot 1982 ; Hough 1969)
<i>Coefficient d'absorption de la flamme</i>	κ_{fl}, m^{-1}	0.4	(Koo et al., 2005)

<i>Temps de résidence de flamme</i>	t_c, s	5	(Koo et al., 2005)
<i>Température des braises</i>	T_b, K	1000	(Koo et al., 2005)
<i>Emissivité des braises</i>	ε_b	0.6	(Koo et al., 2005)
<i>Absorptivité du milieu végétal</i>	a	0.9	(Koo et al., 2005)

Tableau 7 : Expérience F19 : propriétés du combustible végétal, *Themeda australis*, et de la strate végétale.

<i>Caractéristiques atmosphériques mesurées</i>	<i>Valeur</i>
<i>Vitesse moyenne du vent à 2 mètres d'altitude (m/s)</i>	4.8
<i>Vitesse moyenne du vent à mi-hauteur de flamme (m/s)</i>	4.5
<i>Température ambiante (°C)</i>	34
<i>Humidité relative de l'air (%)</i>	20

Tableau 8 : Expérience F19 : conditions environnementales (Cheney et al., 1993).

Résultats de simulation comparés aux résultats expérimentaux

La Figure 39 et la Figure 40 montrent des photographies aériennes du feu après 56s et 86s de propagation et la confrontation des contours de feu obtenus à l'aide du modèle à ceux mesurés expérimentalement. L'accord est excellent, les faibles écarts observés étant dus aux fluctuations au cours du temps des conditions de vent qui engendrent des variations des propriétés de la flamme.

Un changement soudain de la direction du vent (Mell et al., 2007) rend la comparaison modèle/expérience non pertinente après 86s de propagation.

La validation a également porté sur la largeur moyenne du front du feu. Cette longueur caractéristique est un excellent indicateur puisqu'elle n'est autre que le produit de la vitesse de propagation par le temps de résidence de flamme ($d = ros \times t_c$). Là encore, la concordance est excellente, la valeur moyenne obtenue par la simulation est de l'ordre de 11m, très proche de celle évaluée expérimentalement, soit 10m. D'un point de vue qualitatif, le calcul montre des variations notables de la largeur du front, ce qui peut être observé expérimentalement (Cheney et al., 1993).

Comme l'a noté Duarte (Duarte, 1997), relevons dans ce contexte -pour confirmer ce qui a été dit dans l'introduction- qu'aucun modèle basé sur les automates cellulaires n'est capable de restituer la forme parabolique du front du feu observée expérimentalement pour le brûlage F19 par Cheney et al. (1993).

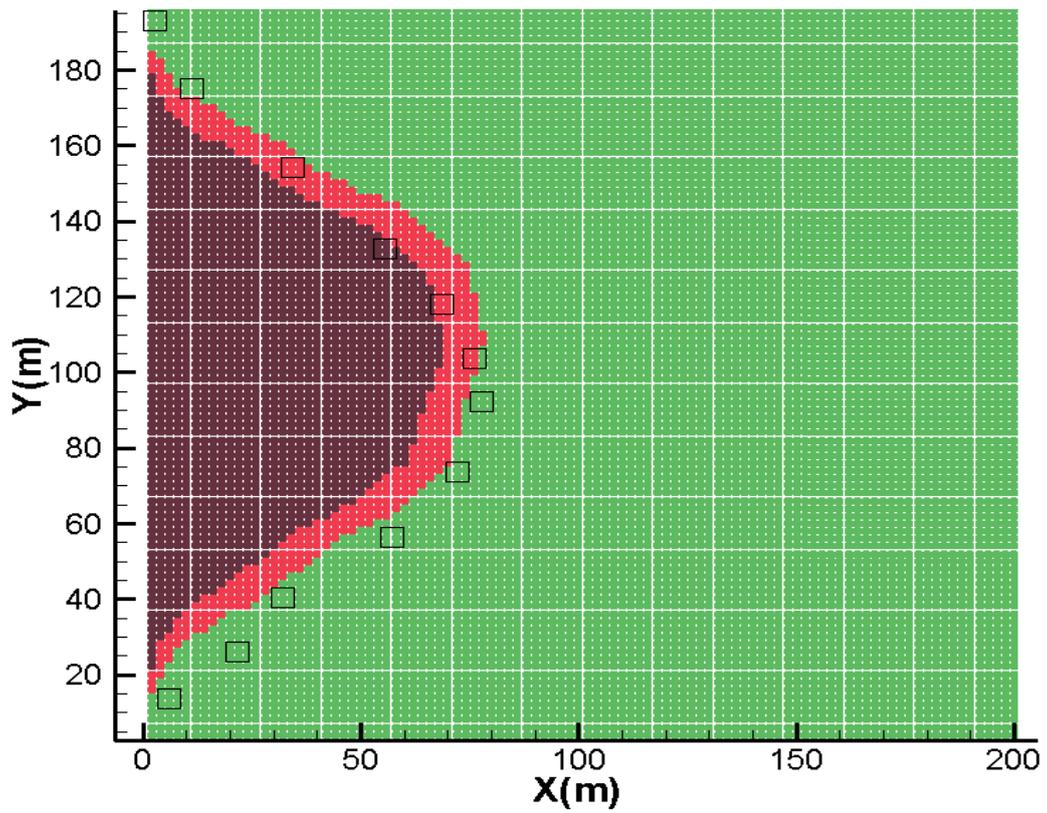


Figure 39: Expérience F19 après 56s de propagation: photographie aérienne du front de feu et comparaison modèle/expérience (symboles).

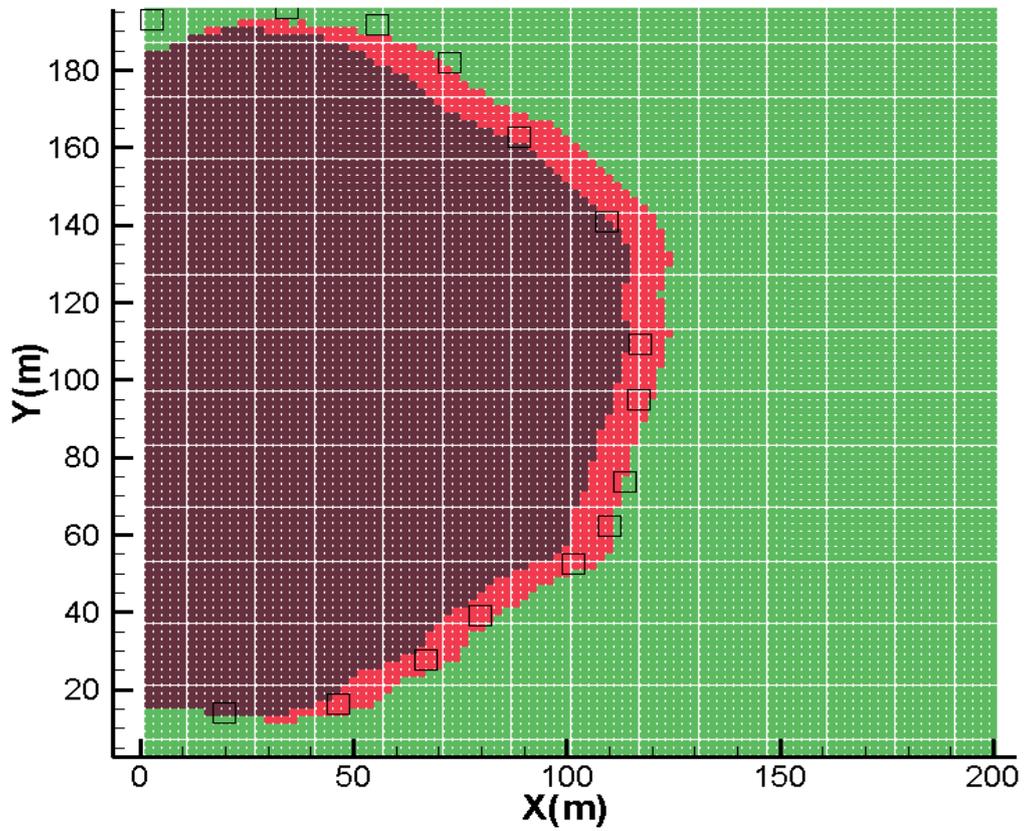


Figure 40 : Expérience F19 après 86s de propagation: photographie aérienne du front de feu et comparaison modèle/expérience (symboles).

4.2 Validation sur le feu historique de Favone (Corse, 2009)

La phase de validation se poursuit par la simulation du feu de Favone en Corse du sud. Cette région est particulièrement sujette aux feux de forêts en raison de conditions météorologiques estivales propices: vent d'Est modéré à fort, température ambiante élevée (généralement supérieure à 30°C), faible humidité relative de l'air (généralement inférieure à 30%), et des conditions de stress hydrique des végétaux.

4.2.1 Chronologie et comportement de l'incendie

Ce feu d'origine anthropique a eu lieu le 08 Juillet 2009 près du village de Favone. Les coordonnées du point d'éclosion ont pu être déterminées : 41°45'57.08`` de latitude, 09°23'44.84`` de longitude et une altitude de 33 mètres. Le feu a été détecté très précocement, vers 3.00pm. Il s'est propagé sous l'effet d'un vent de Sud-Est de 18km/h pour brûler une superficie totale de 30 hectares.

Le feu de Favone présente un intérêt indéniable pour l'étude des effets de pente sur le comportement du feu puisque la propagation s'est faite tout d'abord en pente ascendante, entre les points A et B, puis en pente descendante, entre les points B et C (*Figure 41*).

Les premières équipes de lutte arrivent sur place vers 3.05 p.m. c'est-à-dire 5 minutes après le déclenchement du feu. Le feu menace quelques résidences et des sites urbains au niveau du flanc gauche. Pour lui faire face, trois équipes (chaque équipe est composée d'un camion-citerne et de pompiers) sont déployées pour protéger les zones urbaines et contraindre le feu au niveau de son flanc gauche où se situent ces zones. L'allure du terrain ainsi que l'intensité du feu ne permettent pas une attaque directe au niveau de la tête du feu. Des moyens aériens (quatre canadairs) œuvrent tout d'abord sur le flanc gauche pour protéger les zones urbaines et permettre aux pompiers d'intervenir en sécurité. Ils attaquent ensuite le flanc droit dans l'espoir de pousser le feu vers la mer. Le feu traverse la route à 4.00 p.m. et atteint la mer à 4.15 p.m. Le feu est maîtrisé à 7.00 p.m.

Le retour d'expérience a permis d'estimer la vitesse de propagation du feu entre les points A et B à environ 920 m/h et à 666m/h entre les points B et D.

4.2.2 Description du site de Favone

Le site est situé près de la mer. Le terrain est légèrement vallonné, avec deux grands versants n'excédant pas 100 mètres d'altitude (*Figure 41*). La région est caractérisée par un climat méditerranéen subaride typique, avec un déficit d'eau du mois de mai jusqu'au mois de septembre et la plupart des précipitations se font pendant la saison d'hiver.



Figure 41 : Site de Favone : topographie du terrain, périmètre du feu (en noir) et types de végétation comme définis dans le Tableau 9 (Santoni & al. ,2011).

La zone brûlée était composée de trois espèces végétales principales : une petite partie est formée par un bois de *Quercus suber* (chêne-liège) près du point d'allumage (presque 9 ha). Près de la plage et de la route (à la fin du feu, point D dans la figure 41), la surface était couverte d'arbustes avec des hauteurs de plantes qui avoisinent 1.8m. Ce type de végétation est un mélange d'herbe et d'arbustes avec un taux de couverture de 90% pour le couvert d'arbustes et un taux de couverture de 50% pour l'herbe en dessous des arbustes. Les espèces dominantes sont : *Erica arborea* (60%), *Phyllirea angustifolia* (15%) et *Myrtus communis* (15%).

Nom du type de combustible	Numéro identifiant	Description
Alpine land	1	Herbe au-dessus de la végétation forestière.
Mountain land	2	Arbustes de hauteur < 0.6m
Pine land1	3	Futaie de Pinus laricio avec un étage < 2m
Pine land 2	4	Futaie de Pinus laricio avec un sous-étage réduit.
Pine land 3	5	Futaie de pinus Pinaster fermé avec un sous-étage > 2m.
Shrubland1	6	Futaie de Pinus Pinaster ouvert avec maquis < 2m.
Oak land 1	7	Futaie de Quercus suber fermé avec maquis > 2m.
Schrubland 2	8	Futaie de Quercus suber ouvert avec maquis < 2m.
Oak land 2	9	Futaie de Quercus ilex fermé avec maquis > 2m.
Schrubland 3	10	Futaie de Quercus ilex ouvert avec maquis < 2m.
Schrubland 4	11	Maquis avec arbustes de 0.6 à 4 mètres
Grassland	12	Herbacés et pâturage
Urban area	13	Zone urbaine

Tableau 9 : Les complexes combustibles principaux identifiés sur l'île de Corse.

4.2.3 Conditions environnementales

Deux régimes de vent dominant dans cette zone. Le premier, plus fréquent, consiste en un vent d'Est dû à l'effet de la brise de mer. Il est présent toute la journée du côté Est de la Corse. Le second est un régime d'ouest dû à une circulation atmosphérique à grande échelle. Il souffle principalement la nuit et après 4.00 p.m., quand les effets de la brise marine cessent. Les directions prédominantes du vent sur le site sont typiquement Ouest et Sud-ouest. Dans le cas du feu de Favone, les vitesses du vent se situaient entre 5 et 7 m/s et la direction du vent variait entre 240° et

270°. La température de l'air variait entre 25°C et 27°C durant le feu, et l'humidité relative de l'air ambiant entre 41 et 46 %.



Figure 42 : Point d'allumage et propagation ultérieure. (Santoni et al. ,2011)

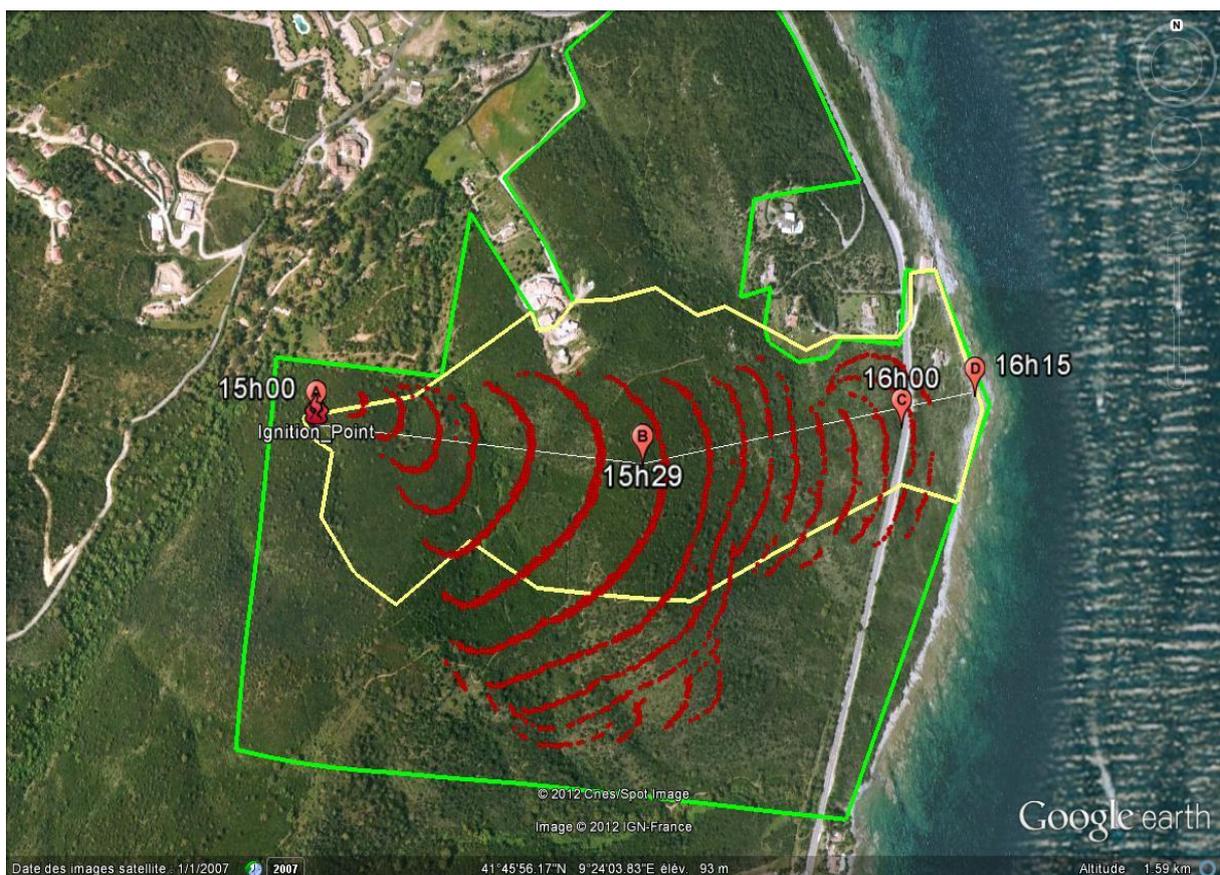


Figure 43 : Contours du feu (en rouge) simulés toutes les 5 minutes. La ligne jaune délimite la surface réellement ravagée par le feu.

Echelle	Description	Symbole [unités]	Valeur utilisée
Eléments fins	Contenu en résidu charbonneux	$\nu_{char} [-]$	0.3
	Rapport surface volume	$\sigma_k [m^{-1}]$	5544
	Masse volumique	$(\rho_k)_{dry} [kg \cdot m^{-3}]$	720
	Capacité thermique spécifique	$(Cp_k)_{dry} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	1900
	Teneur en eau initiale	$FM C_0 [-]$	0.69
	Charge	$m_{DFF}'' [kg \cdot m^{-2}]$	2.682
Cellule végétale	Taille de la cellule	$D [m]$	3
	Compacité	$\alpha_k [-]$	0.0005
	Absorptivité	a_{fb}	0.9
	Emissivité	ε_{fb}	0.9
	Hauteur de la strate	$H[m]$	3.0
	Température d'allumage	$T_{ign} [K]$	561
Flamme	Temps de résidence	$t_c [s]$	30
	Température	$T_{fl} [K]$	1150
	Coefficient d'extinction	$\kappa [m^{-1}]$	0.4
Réseau	Vitesse moyenne du vent	$U [m \cdot s^{-1}]$	6
	Humidité relative de l'air	$HR [\%]$	42
	Dopage	$p [-]$	0.50

Tableau 10 : Variables d'entrée pour le calcul de la propagation du feu de Favone.

Les contours sont simulés avec un vent local déterminé à l'aide du logiciel Flowstar à partir de la direction et de l'intensité du vent moyen, et en tenant compte des effets liés à la topographie et à la rugosité du terrain. Les contours en rouge sont les contours du feu simulés toutes les 5 minutes. Le feu accélère dans la montée entre les points A et B et décélère en descendant la pente entre les points B et D.

On constate qu'il y a un bon accord entre la vitesse de propagation du feu entre les points A et B pour la propagation simulée à l'aide du modèle et la vitesse réelle du feu. De même, la vitesse entre les points B et C est proche de la vitesse réelle. La surface brûlée est bien prédite surtout au niveau de la dernière partie du domaine ravagé par le feu. L'action des moyens de lutte n'a pas été modélisée, ce qui explique que le modèle surestime l'expansion latérale du feu.

5 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce travail de thèse a été de développer un modèle de propagation de feu de végétation à grande échelle en tenant compte des phénomènes physiques qui régissent les transferts de chaleur de la zone brûlée vers la zone imbrûlée à l'échelle macroscopique et en considérant la plupart des paramètres qui peuvent influencer le comportement du feu.

Notre première tâche a consisté à générer un réseau amorphe de sites pour représenter au mieux le caractère aléatoire de la distribution de végétation que l'on observe naturellement. Dans ce but, des méthodes de génération ont été développées selon la densité de végétation souhaitée et sa polydispersité.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux mécanismes de transfert de chaleur entre le front de flamme et la végétation située en amont de ce dernier. On a opté pour l'utilisation de la méthode Monte Carlo afin de modéliser le transfert du rayonnement thermique issu de la flamme vers le site encore imbrûlé. Cette méthode s'est avérée performante, notamment pour le calcul des facteurs de forme utilisés généralement en sécurité incendie. Il est utile d'utiliser cette méthode surtout dans le cas où le feu se propage sur un terrain accidenté, puisqu'elle est adaptée aux configurations présentant des géométries complexes. L'application de la méthode Monte Carlo a nécessité d'approximer la flamme à une forme géométrique simple dans le cadre du modèle de flamme solide et d'estimer les propriétés de la flamme tels que sa hauteur moyenne, son angle d'inclinaison et son pouvoir émissif. En faisant l'hypothèse que la flamme de végétation est un corps gris, l'aspect spectral de son rayonnement n'a pas été considéré.

L'effet de la convection forcée dû à la présence du vent est modélisé en considérant un flux de gaz chauds issus du front de flammes, emportés par le vent et atteignant les sites intacts situés dans le sillage d'un site en feu, cet effet diminuant exponentiellement avec la distance au front. Le rayonnement issu des braises et les pertes radiatives du site subissant le préchauffage au profit du milieu ambiant sont également pris en compte. De plus, un modèle approché a été proposé pour prendre en compte l'atténuation du rayonnement provoquée par la couche d'air humide entre le front et la végétation réceptive. Nous avons également pris en compte l'effet d'écran joué par un site intercalé entre le site en feu et le site exposé.

Une fois les transferts thermiques modélisés au niveau d'un site récepteur, l'évolution au cours du temps de sa température peut être prédite. Le processus thermique de dégradation par lequel passe le site préchauffé, jusqu'à l'inflammation, a été modélisé suivant quatre phases : une phase de montée en température jusqu'à atteindre la température de vaporisation de l'eau suivie par une phase de dessiccation du végétal jusqu'à épuisement de toute l'eau qu'il contient, ensuite une nouvelle phase de remontée en température jusqu'à la température de pyrolyse et enfin une dernière phase de pyrolyse où les produits cellulosiques commencent à se transformer en gaz inflammables. Nous avons supposé que l'inflammation du végétal a lieu aussitôt que les produits de pyrolyse sont générés.

Nous avons montré que, moyennant certaines hypothèses (milieu thermiquement fin et vitesse de chauffe constante), le critère d'allumage basé sur la température d'inflammation est équivalent au critère basé sur l'énergie critique d'inflammation.

Pour évaluer la pertinence du modèle, il a été testé sur des configurations simples. Les résultats obtenus pour une végétation continue monodisperse sont conformes aux observations : allure circulaire du contour du feu en absence de vent sur terrain plat, allure elliptique en pente ascendante et en absence du vent ou sur terrain plat en présence du vent, effet accélératif sur la propagation du feu en présence de pente et de vent.

On a étudié de façon quantitative la sensibilité de la vitesse de propagation du feu à certains paramètres du modèle, en particulier ceux qui présentent une grande dispersion lors des mesures. Cette étude de sensibilité a permis d'une part, de hiérarchiser ces paramètres et, d'autre part, d'établir des relations à l'ordre un et plus permettant de corrélérer la vitesse de propagation aux paramètres les plus influents. La simple utilisation de la formule de Byram (1959) permettrait alors d'établir des cartes d'aléa du risque incendie relativement pertinentes.

Le chapitre 4 a été consacré à la confrontation des résultats du modèle aux mesures réalisées sur le terrain à grande échelle, afin d'évaluer la pertinence du modèle et sa fiabilité. Dans un premier temps, des comparaisons entre les contours simulés et les contours réels réalisés lors d'un brûlage dirigé australien, ont montré un excellent accord. Dans un second temps, le modèle de propagation a été confronté à un feu historique qui a eu lieu en Corse en 2009. Les données concernant la propagation de ce feu comprenant la chronologie du feu, les contours à des instants précis, les lacunarités ont été collectées par le SPE de Corte. La comparaison a montré une bonne estimation

de la vitesse de propagation sur les portions du terrain en pente ascendante ou descendante. Les contours simulés sont très proches des contours réels. La surface est surestimée car nous n'avons volontairement pas pris en compte l'intervention des services de secours sur les flancs du feu.

Au final, ce modèle peut servir de base à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision dans l'aménagement des massifs et la prévention des incendies de forêt.

Les perspectives de ce travail sont nombreuses. Parmi celles-ci, nous envisageons à court terme :

- d'étudier certaines configurations topographiques (talweg, rupture de pente) qui peuvent engendrer un comportement atypique de feu de végétation dont les mécanismes sont encore mal compris, comme une augmentation brutale de la surface en feu ou de la vitesse de propagation au cours du temps.
- d'introduire la notion de débit critique de pyrolyse dans le critère d'inflammation pilotée du végétal et caractériser, par l'expérience, ce débit critique ;
- de conduire une étude de sensibilité sur des domaines suffisamment grands pour éviter l'effet de taille et étudier les effets des paramètres influents du modèle sur la vitesse de propagation, mais aussi sur les surfaces brûlée et en feu ;
- d'étudier, avec ce nouveau modèle, le rôle des sautes de feu sur la propagation ;
- d'étudier le comportement du feu dans le cas d'une végétation polydisperse présentant une distribution verticale notable.

RÉFÉRENCES

- 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., Simulating wildfire patterns using a small-world network model, *Ecological Modeling* 221 (2010) 1463-1471.
- Albinet, G., Searby, G., Stauffer, D. (1986). Fire propagation in a 2-d random medium. *Journal de Physique*, 1–7.
- Albini FA (1981) A model for the wind-blown flame from a line fire. *Combust Flame* 43 : 101-113.
- Albini FA (1985) A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Comb. Sci. and Tech.* (42): 229-258.
- Albini FA (1986) Wildland fire spread by radiation, a model including fuel cooling by convection. *Combust Sci Technol* 45: 101-113.
- Albini, F.A., Brown, J.K. (1996) *Mathematical Modeling and Predicting Wildland Fire Effects*. *Combust. Explos. Shock Waves*, 32, 520.
- Alexandridis A., Vakalis D., Siettos C.I., Bafas G.V. (2008) A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. *Appl Math Comput* 204: 191-201.
- Anderson HE, Rothermel RC. Influence of moisture and wind upon the characteristics of free burning. 10th Symposium (int.) on Combustion, The Combustion Institute, 1965. p. 1009-19.
- Balbi J-H., Morandini F., Silvani X., Filippi J-B., Rinieri F. (2009) A physical model for wildland fires. *Combust Flame* 156: 2217-2230.
- Bäck, T., Fogel, D., and Michalewicz, Z. (1997) *Handbook of Evolutionary Computation*. Oxford University Press, Oxford.
- Bard, S., and 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.
- Berjak S.G., Hearne, J.W. (2002) An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system.
- Billaud, Y. (2011). *Modélisation hybride stochastique-déterministe des incendies de forêts*. Thèse de Doctorat de l'Université de Provence.
- Butler, B.W., (1993) In *Proceedings: 12th Conference of Fire and Forest Meteorology*, p. 26.
- Brzustowski, T.A, & Sommer Jr, O.C. (1971) Predicting radiant heating from flames. Mid year Meeting of the API. Philadelphia.
- Byram, G.M. (1959). *Combustion of forest fuels. Forest Fire: Control and Use*. New York: McGraw Hill.

- Caldarelli, G., Frondoni, R., Gabrielli, A., Montuori, M., Retzlaff, R., Ricotta, C. (2001). Analysis of fire spread in light forest fuels. *Europhysics letters*.
- Carty, F. C., Damasceno, P., Silva, J. S., Galante, M., & Moreira, F. (2007). Spatial distribution patterns of wildfire ignitions in Portugal. *Proceedings of the 4th International Wildland Fire Conference*. Seville, Espagne.
- Catchpole W.R., Catchpole E.A., Rothermel R.C., Morris G.A., Butler B.W., Latham D.J. (1998) Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combust Sci Technol* 131: 1-37.
- Cheney, N.P, Gould J.S and Catchpole W.R. (1993) The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire spread in grasslands. *Int. Journal of Wildland Fire*, 3(1): 31-44.
- Cheney, N.P, Gould J.S, and Catchpole W.R. (1998) Prediction of fire spread in grasslands. *Int. Journal of Wildland Fire*. 9 (1): 1-13.
- Chuvieco, E. (2009) *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Springer.
- Clerc, J-P. (1983). La percolation. *Annales de physiques*.
- De Gennes, P-G. (1976). La percolation: un concept unificateur. *La Recherche*, 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.
- Duarte, J. (1997) Bushfire automata and their phase transitions. *International Journal of Model Physics C*, 8(2):171-189.
- Dupuy J.L. & Morvan D. (2005) Numerical study of the crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model. *International Journal of Wildland Fire*, 14: 141-151.
- Emmons, H., (1963) Fire in the forest. *Fire research abstracts and Review* (5): 163-178.
- Fang, J.B., and Steward, F.R, (1969) Flame spread through randomly packed fuel particles. *Combustion and flame* (13): 392-398.
- Favier C. (2004) Percolation model of fire dynamic. *Physics Letters A* : 396-401.
- Finney, M.A., (1998) *FARSITE: Fire Area Simulator – Model development and Evaluation*. USDA Forest Service Research Papers RMRS-RP-4, Missoula, MT.
- Frandsen W.H. (1971) Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combust Flame* 16: 9-16.
- Gen, M. and Cheng, R. (1997) *Genetic Algorithms and Engineering Design*. Wiley, New York.
- Goldberg, D. (1989) *Genetic Algorithms: in Search, Optimization & Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Graham, I. and Matthai, C. (2003) Investigation of the forest-fire model on a small-world network-art. no. 036109 *Physical Review E*, 6803(3):

- Grishin, A.M. (1997) *Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them*. Pub. House of the Tomsk State University, Tomsk, Russia, English translation edition. Translated from Russian by Marek Czuma, L Chikina and L Smokotina.
- 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.
- Heskestad, G. (1983) Luminous Heights of turbulent diffusion flames. *Fire safety journal* (5): 103-108.
- Høekstra, A.G., Sloot, P.M., & Chopard, B. (2010). *Modelling Complex Systems with Cellular Automata*. Springer Verlag.
- Hottel H.C., Williams G.C., Steward F.R. (1965) Modeling of fire spread through a fuel bed. *Proc Combust Inst* 10: 997-1007.
- Innocenti E., Silvani X., Muzy A., Hill D.R.C. (2009) A software framework for fine grain parallelization of cellular models with OpenMP: Application to fire spread. *Envir Model Softw* 24: 819-831.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T, Lavine, A (2007) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley and Sons, 6th edition, New York.
- Kaiss, A., Zekri, L., Zekri, N. , Porterie, B., Clerc, J.P., Picard, C., Fuelbreak efficiency for wildland fire prevention, *C.R. Phys.* 8(3-4) 462-468, 2007.
- Kays, W.M., and Crawford, M.E. (1993) *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- Konev E.V., Sukhinin A.I. (1977) The analysis of flame spread through forest fuel. *Combust Flame* 28: 217-223.
- Koo E., Pagni P., Woycheese J., Stephens S., Weise D., Huff J. (2005) A simple physical model for forest fire spread. *Proc Fire Safety Sci* 8: 851-862.
- Kourtz, P., O'Regan, W.G. (1971). A model for a small forest fire to simulate burned and burning areas for use in a detection model. *Forest Science*.
- Larini M., Giroud F., Porterie B. and J.-C. Loraud A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41:881-897, 1998.
- Lautenberger, C., Rein, G., and Fernandez-Pello, C. (2006) The Application of a Genetic Algorithm to Estimate Material Properties for Fire Modeling from Bench-Scale Fire Test Data. *Fire Saf. J.*, 41, 204.
- Lemonnier, D. & Porterie, B. (2007) Rayonnement et couplage avec la convection dans un milieu semi-transparent en écoulement. *Cours*.
- Linn, R.R., Reisner, J., Colman, J.J., and Winterkamp, J., (2002) Studying Wildfire Behavior Using FIRETEC, *International Journal of Wildland Fires*, **11**, (4): 233-246.

- McCaffrey, B., (1995) Flame Height. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., DiNenno, P.J., et al., eds., National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- Mangiavillano, A. (2008). Multi-scalarité du phénomène feu de forêt en régions méditerranéennes françaises de 1973 à 2006. Université d'Avignon, France.
- Margerit, J. (1998). Modélisation et simulations numériques de la propagation de feux de forêts. Poitiers: Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Margerit, J., & Séro-Guillaume, O. (1997). 13ième Congrès de Mécanique, (pp. 235-238). Poitiers.
- Margerit J., Séro-Guillaume O. (2002) Modeling forest fires. Part II: reduction to two-dimensional models and simulation of propagation. *Int J Heat Mass Trans* 45: 1723-1737.
- Mell, W., Jenkins, M. A., Gould, J., & Cheney, P. (2007). A Physics-Based Approach to Modeling Grassland Fires. *International Journal of Wildland Fire*, 1-22.
- Mindykowski P., Fuentes A., Billaud Y., Consalvi J-L., Porterie B. (2009) Piloted Ignition of Wildland fuel Materials. 6th Mediterranean Combustion Symposium, Porticcio, France.
- Mindykowski P., (2010). Etude des mécanismes d'inflammation impliqués dans le développement des feux de végétation. Thèse de doctorat de l'université de Provence.
- Mendes-Lopes J.M.C., Ventura J.M.P., Amaral, J.M.P., *Int. J. Wildland Fire* 12 (2003) 67–84.
- Montgomery, D.C., (2004) Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, 6th edition.
- Muzy A., Nutaro J.J., Zeigler B.P., Coquillard P. (2008) Modeling and simulation of fire spreading through the activity tracking paradigm. *Ecological Model* 219: 212-225.
- 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.G. (1973) Flame spread through porous fuels. *Proc Combust Inst* 14: 1099-1107, The combustion institute, Pitts., PA.
- Parker, W.J. (1988) Prediction of the heat release rate of Douglas fire. International Association for Fire Safety Science, Hemisphere Publishing, New York.
- Pastor, E., Zarate, L., Planas, E., & Arnaldos, J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*.
- Porterie B., Morvan D., Loraud J-C., Larini M., Firespread through fuel beds: modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics, *Physics Fluids* 12(7), 1762-1782, 2000.
- Porterie B., Zekri N., Clerc J-P., Loraud JC (2005) Un réseau de Petit Monde local à sites pondérés pour les feux de forêts. *Comptes Rendus Physique* 6: 151-157.
- Porterie B., Consalvi J-L., Loraud J-C., Giroud F., Picard C., Dynamics of wildland fires and their impact on structures, *Combustion and Flame*, 149(3) 314-328, 2007.

- Porterie B, Zekri N, Clerc JP, Loraud J-C. (2007) Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. *Combust Flame* 149: 63-78.
- Putnam, A.A. (1965) A model for the windblown flame from a line fire. *Proceedings of tenth International Symposium on Combustion*: 1039-1046. The Combustion Institute, Pitts., PA
- Quintiere, J.G. (1997) *Principles of fire behavior*. Delmar Publisher.
- Raudensky, M., Woodbury, K.A., Kral, J., and Brezina, T. (1995) Genetic Algorithm in Solution of Inverse Heat Conduction Problems. *Numer. Heat Transfer, Part B*, 28, 293.
- Robin, J.G., Carrega, P., Fox, D.M. (2006). Modelling fire ignition in the Alpes-Maritimes department, france : A comparison. *Forest Ecology and Management*.
- Rothermel R.C. (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *Res Pap INT-115, USDA Forest Service Research Papers INT-115, Ogden, UT, 1972*.
- Saltelli A. & Annoni P. (2010) How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. *Environmental Modelling and Software* (25): 1508-1517.
- Saltelli A., Tarantola S. and Chan K. (2004) *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*. Wiley.
- Santoni P-A, Filippi J-B, Balbi J-H, Bosseur (2011) Wildland fire behaviour case studies and fuel models for landscape-scale fire modelling, *Journal of Combustion*, ID 613424, 12 pages.
- Simeoni A., Santoni P-A., Larini M., Balbi J-H. (2001) On the wind advection influence on the fire spread across a fuel bed: modeling by a semi-physical approach and testing with experiments. *Fire Safety J* 36: 491-513.
- Sneeuwagt, R.J., & Frandsen, W.H. (1977) Behavior of experimental grass fires vs. predictions based on Rothermal's fire model. *Canadian Journal of Forestry Research*, 357-367.
- 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. 2003. Large forest fires in Canada, 1959-1997. *Journal of Geophysical Research* 108:8149-8161.
- Sullivan, A.L. (2008). A review of wildland fire spread modelling, 1990-present. *ArXiv*.
- Thomas PH, Pickard RW. *Fire spread in forests and heathland materials*. Report Forest Research, Her Majesty's Stationary Office, London, 1961.
- Thomas PH. The size of flames from natural fires. 9th Symposium (int.) on Combustion, The Combustion Institute, 1963. p. 844-59.
- Thomas P.H. (1967) Some aspects of the growth and spread of fires in the open *Forestry* 40: 139-164.

- V. Tihay, F. Morandini, P.A. Santoni, Y. Perez-Ramirez and T. Barboni (2012) Study of the influence of fuel load and slope on a fire spreading across a bed of pine needles by using oxygen consumption calorimetry, Eurotherm 2012, Poitiers.
- Trabaud, L. (1976) Inflammabilité et combustibilité des principales espèces des garrigues de la région méditerranéenne. *Ecologia Plantarum*, 117-136.
- Trabaud, L. (1979) Etude du comportement du feu dans la garrigue de Chêne kermès à partir des températures et des vitesses de propagation. *Annals of Forest Science*, 13-38.
- Trabaud, L. (1997) Les feux de forêts. Mécanismes, comportement et environnement. France-Selection.
- Van Vagner, C. (1967) Calculation on forest fire spread by flame radiation, Canadian Department of Forestry and Rural development Forestry Branch: technical report Departmental Publication no.1185.
- Viegas, D.X. (2005) A mathematical model for forest fires blowup. *Combustion Science and Technology*, 27-51.
- Von Neumann, J. (1966) Theory of Self-Reproducing Automata. University of Illinois.
- Watts, D. J., Strogatz, S. H. (1998) Collective dynamics of small-world networks. *Nature*.
- Weber R.O. (1989) Analytical models for fire spread due to radiation. *Combust Flame* 78: 398-408.
- Yassemi S., Dragičević S., Schmidt M. (2008) Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behavior. *Ecol Model* 210: 71-84.
- Zaïda J. (2012) Etude expérimentale et numérique de la dégradation thermique des lits combustibles végétaux, Thèse de l'Université de Ouagadougou, Burkina Faso.
- Zekri, N., Porterie, B., Clerc, J-P., Loraud, J-C. (2005) Propagation in a 2D weighted local Small World Network. *Physical Review E* Vol.71 046121(1-5).