

ACTES DE LA JOURNÉE THÉMATIQUE

RISQUES MAJEURS ET AMÉNAGEMENTS DU TERRITOIRE

LE RISQUE INCENDIE

**8 AOÛT
2012**

LETIA, CORSE-DU-SUD
EGLISE SAN ROCCU

[HTTPS://SITES.GOOGLE.COM/SITE/JTLETIA2012](https://sites.google.com/site/jtletia2012)

PREFACES

La vulgarisation des travaux scientifiques ainsi que de la réglementation en vigueur auprès de la population est un des objectifs majeurs des chercheurs et des décideurs. Concernant la thématique des feux de forêt, la Municipalité de Letia, consciente des risques sur le territoire de sa commune, a mené une réflexion qui l'a conduite à travailler avec des membres du projet « Feux » de l'Université de Corse Pasquale Paoli. La conjonction des travaux du Conseil Municipal, du Parc Naturel Régional de Corse et des universitaires de Corte a déjà permis :

- de mettre en place des réunions/débats avec la population ;
- de réaliser un document technique (A VOCE DI LETIA, 2009) qui a aidé à prendre conscience de l'urgence qu'il y a à débroussailler, comme l'impose la loi du 09 juillet 2001 ;
- de réaliser deux feux dirigés sur les hauteurs du village avec la mise en place d'instruments de mesures par les chercheurs de l'Université ;
- de lancer une étude scientifique sur le dimensionnement des ouvrages autour des constructions de la commune.

La Municipalité de Letia en partenariat avec le Parc Naturel Régional de Corse, l'Université de Corse Pasquale Paoli et le CNRS se propose de franchir une étape supplémentaire en organisant une journée thématique sur le risque incendie et l'aménagement du territoire où des chercheurs, des institutionnels, des opérationnels viendront exposer des travaux et où la population pourra échanger avec eux.

Cette manifestation permet la vulgarisation des connaissances fondamentales et empiriques sur les incendies de forêt. Elle répond également à une demande forte de la population de la commune en ce qui concerne la sécurité incendie. De plus, elle s'inscrit pleinement dans les enjeux territoriaux de la Corse : gestion des forêts, mise en place de plans de prévention des risques...

Jean-Luc Chiappini †
Maire de Letia
Président du Parc Naturel Régional de Corse

Dans les régions méditerranéennes, les incendies de forêt constituent l'une des plus importantes menaces pour l'environnement, l'activité socio-économique ainsi que pour la sécurité des populations.

Chaque année une partie de la Corse part en fumée. Les causes des incendies de forêt sont très diverses (accidents, imprudences, écobuages, décharges sauvages, conflits d'usage de l'espace, etc.) et les dommages qu'ils créent sont nombreux (désertification, érosion du sol, assèchement des sources et torrents, destruction des ressources, diminution des fonctions de régulation, destruction directe, etc.). Et le risque d'incendie est croissant dans nos régions et sera un enjeu majeur aux cours des prochaines décennies, du fait de l'augmentation des températures et de la sécheresse récurrente.

L'Université de Corse, le CNRS et le Parc Naturel Régional de Corse, conscients de l'importance de cette problématique et forts d'une collaboration lors de feux dirigés sur les hauteurs du village de Letia ont organisé une journée thématique «Risques Majeurs et Aménagement du territoire incendie». Il est en effet important pour l'Université de ne pas couper la recherche (science) de son contexte social, culturel et historique (local) et de diffuser des connaissances fondamentales sur les incendies de forêt et d'opérer un transfert auprès des partenaires, institutionnels et opérationnels chargés de la lutte et de l'aménagement du territoire.

Paul-Marie ROMANI
Président de l'Université de Corse

Depuis plus de 10 ans, la politique scientifique du laboratoire CNRS SPE 6134 « Sciences Pour l'Environnement (unité mixte de recherche de l'Université de Corse et du CNRS) » est basée sur une logique de projets afin de recentrer nos thématiques de recherche dans des domaines à fort ancrage régional.

La valorisation de la recherche, au travers d'actions de transfert de technologie vers le monde socio-économique ou de diffusion de la connaissance auprès des institutionnels partenaires, constitue un des axes forts de notre stratégie. Le projet « Modélisation et expérimentation des feux de végétation » qui recouvre des recherches théoriques, expérimentales et numériques s'inscrit tout naturellement dans ce cadre.

Basées sur des recherches fondamentales et une très grande pluridisciplinarité permettant d'appréhender les mécanismes qui gouvernent le comportement des feux de végétation, les membres du projet sont en capacité de proposer un ensemble d'outils ou de méthodes aux professionnels du feu et aux institutionnels pour la prévision, la prévention ou la lutte. Les nombreuses collaborations avec les professionnels et les institutionnels, l'organisation de manifestations telle que la journée de Letia permettent aux chercheurs du projet « Modélisation et expérimentation des feux de végétation » d'adapter leurs travaux autour des domaines d'application et en fonction des besoins exprimés par les partenaires sur des problématiques de terrain.

Cette synergie entre recherche fondamentale et recherche appliquée au cœur du projet permet de créer des partenariats pour la construction de plateformes expérimentales indispensables pour pouvoir passer du niveau « expérimental » au niveau « opérationnel ». Outre le lien qui peut se créer avec les opérationnels, les retours d'expériences que constituent ces rencontres permettent à notre recherche fondamentale d'approfondir les questions identifiées et même de les réorienter pour être plus en rapport avec la réalité du terrain.

En conclusion, la journée de Letia permet de donner un élan utile à nos travaux de recherche et devrait être généralisée.

Paul-Antoine Bisgambiglia
Directeur du laboratoire Sciences Physiques pour l'Environnement l'U.M.R. C.N.R.S. 6134

TABLE DES MATIÈRES

Comprendre le comportement des feux de forêt	p. 6
A. SIMEONI	
Une politique régionale de protection contre les incendies en corse, le Plan de Protection des Forêts et des Espaces Naturels contre les Incendies (PPFENI : 2006-2012).....	p. 9
C. PERRIN	
Le risque incendie dans la Charte forestière du Fium'Orbu.....	p. 12
P. PERALDI	
Principaux résultats du projet Proterina-C	p. 14
P.-A. SANTONI, T. BARBONI, P. CARAMELLE	
Potentialités offertes par la vision pour le développement d'instruments de mesure dédiés aux feux de forêt.....	p. 21
L. ROSSI, M. AKLHOUFI, A. PIERI et Y. TISON	
Feux éruptifs : Prévoir le déclenchement d'une éruption	p. 26
F.J. CHATELON, J.H. BALBI, J.L. ROSSI, T. MARCELLI, J.B. FILIPPI, A. SIMEONI, C. ROSSA, D.X. VIEGAS	
Modèle analytique pour l'évaluation des distances de sécurité.....	p. 30
J. L. ROSSI, A. SIMEONI, B. MORETTI et V. LEROY-CANCELLIERI	
Simulation de grands incendies avec ForeFire	p. 35
J.-B. FILIPPI	

Comprendre le comportement des feux de forêt

A. SIMEONI

Department of Fire Protection Engineering
Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01545, USA
Tél.: +1 508 831 5785; fax: +1 508 831 5862; e-mail: asimeoni@wpi.edu

Résumé

Cet article présente de manière simplifiée le comportement des feux de forêt et plus particulièrement le principe de leur propagation. Pour ce faire, les mécanismes de base de propagation des feux sont détaillés et les paramètres extérieurs influant sur la propagation sont décrits. Par la suite, quelques types de feux extrêmes sont discutés car ils représentent des cas où la description classique de la propagation ne s'applique pas. Cette analyse met en valeur le fait que les connaissances fondamentales doivent encore être développées pour mieux alimenter la recherche appliquée et fournir les solutions de demain aux opérationnels de terrain en matière de lutte et de prévention.

1. Introduction

Depuis plusieurs années, les feux de forêt – pris au sens large des feux de végétation – sont devenus le risque majeur le plus répandu dans tout le Sud de l'Europe. En effet, la conjonction de la désertification des zones rurales qui entraîne une diminution des zones cultivées, de la forte fréquentation des sites naturels et boisés due aux activités touristiques et des changements climatiques en cours rendent ce phénomène de plus en plus fréquent et ses conséquences de plus en plus catastrophiques.

Au-delà de la zone méditerranéenne, les cinq continents sont touchés, de la Californie à l'Australie en passant par les forêts boréales d'Amérique du Nord et de Russie jusqu'aux forêts humides de l'Amazonie et de l'Océanie. L'Afrique est même surnommée le continent du feu à cause de ses feux récurrents de savane et de la régression de sa forêt tropicale. Les feux de forêt ont un impact sur les activités humaines, que ce soit au niveau de la santé (qualité de l'air), de l'activité économique (fermeture d'aéroports, évacuation de zones entières, destruction d'infrastructures) ou des biens immobiliers (destruction de maisons et de commerces). L'impact sur l'environnement est aussi très important en termes d'érosion des sols, d'appauvrissement des écosystèmes et de réchauffement climatique.

Aujourd'hui plus que jamais, il est donc nécessaire de développer des outils scientifiques d'aide à la décision en matière de lutte et de prévention. Cet article est dédié à la description des mécanismes de propagation des feux de forêt qu'il est nécessaire de comprendre et de décrire afin de développer ces outils scientifiques. Le phénomène des feux est d'une grande complexité et les paramètres qui peuvent influencer sur sa propagation sont très nombreux, complexes et interdépendants. Nous nous limiterons donc à une description simple de la physico-chimie des feux de forêt et de leur propagation. Pour une présentation plus détaillée incluant les différentes approches de modélisation de la propagation des feux et les activités expérimentales liées à la validation des modèles, le lecteur intéressé peut se référer à [1].

Par la suite, nous allons décrire la propagation d'un feu en séparant les mécanismes de propagation et les paramètres extérieurs influant sur le feu. Ensuite, nous présenterons succinctement quelques cas extrêmes de comportement du feu.

2. Une description simplifiée de la propagation des feux

Les mécanismes de base de la propagation du feu

Considérons un morceau de végétation imbrûlée au voisinage d'un feu (portion entourée en blanc et zoomée dans la figure 1.a.). Ce morceau, que nous appellerons particule, car nous allons raisonner sur de petites tailles par rapport au front de feu, est soumis aux transferts de chaleur en provenance du front de feu qui s'approche.

Les transferts de chaleur qui influent sur la propagation du feu sont essentiellement de deux sortes : radiatifs et convectifs. Le transfert radiatif est un transfert de chaleur par onde électromagnétique, c'est-à-dire qu'il n'a pas besoin de matière pour le transporter. Les zones du front de feu qui créent ce rayonnement sont les flammes et les braises. Les transferts convectifs sont eux liés à la masse (ou à la matière) dans le sens où ils sont créés par le mouvement des gaz chauds qui vont entrer en contact avec la végétation imbrûlée et la réchauffer.

Quand la particule de végétation est soumise à ces transferts thermiques, elle monte d'abord en température. Une fois que sa température est suffisamment élevée (proche de 100°C), elle commence à se déshydrater, c'est-à-dire à perdre son eau (cf. figure 1.b). La quantité d'eau contenue dans la végétation joue un rôle important car elle absorbe la chaleur en provenance du feu en s'évaporant et crée ainsi un effet tampon qui retarde ou même empêche l'ignition de la végétation.

Une fois que la particule de végétation est sèche, elle commence à se dégrader ou à pyrolyser (cf. figure 1.c). C'est-à-dire que, sous l'effet des transferts thermiques provenant du front de feu, elle se volatilise. Une grande partie des gaz émis est inflammable et se mélange à l'oxygène contenu dans l'air. Quand le feu est assez proche, le mélange gazeux s'enflamme et le feu s'est propagé. Dans un premier temps, le feu a lieu en phase gazeuse. Les braises apparaissent quand la particule de végétal a fini d'émettre des gaz et s'est complètement transformé en charbon. La combustion n'a plus lieu dans le gaz mais au niveau de la particule, ce qui la fait rougeoier. On parle alors de braises qui dégagent une grande quantité de chaleur par rayonnement et brûlent très lentement. Enfin, lorsque les braises ont brûlé, il ne reste que la partie minérale du combustible, c'est-à-dire les cendres.

Un feu se propage donc grâce à la conjonction de trois facteurs : la présence de gaz inflammables, la présence d'oxygène (dans l'air) et la présence d'une source de chaleur assez intense pour enflammer le mélange. C'est ce que les pompiers appellent le « triangle du feu ». Si on supprime une des trois causes, le feu ne peut plus se propager.

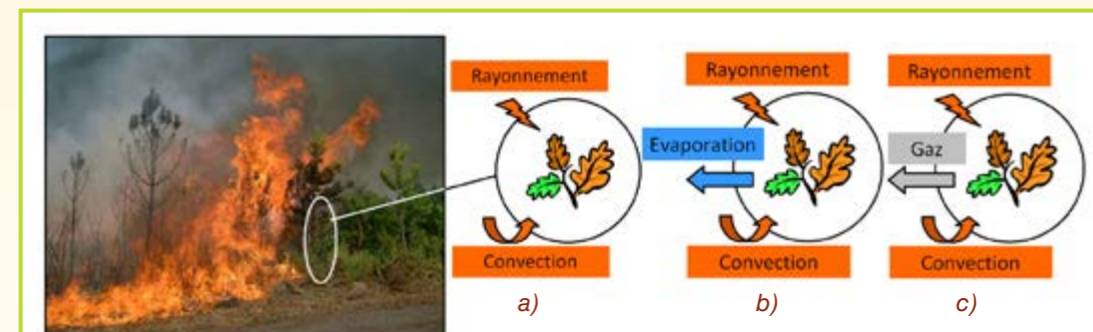


Figure 1 : Phénomène de propagation d'un feu de forêt
a) transferts thermiques - b) évaporation - c) pyrolyse

Paramètres extérieurs

Les paramètres extérieurs les plus évidents sont la distribution de la végétation, le vent et la pente. La distribution spatiale de la végétation influence directement sur la propagation du feu. Par exemple, les différences de taille et de densité de végétation impliquent des feux d'intensité plus ou moins grande et des vitesses de propagation plus ou moins élevées. De plus, les constituants d'une même plante participent plus ou moins à la propagation du feu. Les structures fines (feuilles ou aiguilles) sont les plus impliquées dans la propagation du feu car ce sont les parties de la plante qui brûlent plus vite. Certains végétaux sont aussi plus combustibles que d'autres comme les résineux par rapport aux feuillus. Enfin, l'humidité de la végétation est un des facteurs les plus importants, une végétation humide pouvant brûler très difficilement ou même arrêter le feu alors qu'une végétation très sèche va brûler très vite et de manière très intense.

Le vent a un effet évident de « coucher » les flammes. Comme il apporte aussi de l'air frais, il attise le feu en accélérant la combustion, ce qui allonge les flammes. Celles-ci étant plus longues et plus penchées, les transferts thermiques sont plus importants : la source de rayonnement est plus grande, s'est rapprochée de la végétation imbrûlée et une plus grande quantité de gaz chauds « lèche » la végétation. Ce changement de comportement peut induire des accélérations importantes du front de feu. Un des autres effets du vent est de rendre le front de feu plus profond car le feu parcourt une grande distance avant que la végétation ne s'éteigne. Un feu qui « court » a donc tendance à être intense et difficile à combattre. Cependant, il peut avoir un impact plus faible sur la végétation car il la chauffe pendant moins de temps, l'arrière du feu étant refroidi par le vent.

Le dernier effet est l'effet du terrain ou de la pente. Les flammes étant plus proche de la végétation dans le sens de la pente, une particule de végétation imbrûlée faisant face au feu va se retrouver soumise à un rayonnement plus intense que ses voisines qui sont situées sur les flancs du feu. La tête du feu va donc se propager plus vite que les flancs et le feu va accélérer. De plus, les feux se propageant en pente ascendante ont souvent un comportement semblable à celui du vent. En effet, la végétation face à la pente se retrouve plus proche des flammes et l'aspiration d'air se fait plus facilement par le bas que par le haut, ce qui a tendance à coucher les flammes dans le sens de la pente. Dans un relief confiné, l'effet peut être extrême, comme décrit pour les feux éruptifs dans la section suivante.

3. Certains phénomènes extrêmes de propagation des feux

Le feu, parfois ne suit pas le comportement prévisible que nous lui prêtons, mais adopte des comportements extrêmes. Même s'il existe de nombreux cas, nous n'en citerons deux : les feux éruptifs et les feux couvants.

Les feux éruptifs

Les éruptions de feux impliquent une augmentation soudaine de la vitesse de propagation du feu dans des zones à la topographie encaissée. Sous des conditions particulières de pente, de vent et de végétation, un feu se propageant à une vitesse classique (et déjà élevée) de 3 km/h peut « entrer en éruption » et atteindre des vitesses de propagation de 15 à 30 km/h. Ceci crée l'apparition d'une zone en feu de très grandes dimensions, comme on peut le voir dans la figure 2.a pour le feu de Palasca (image extraite d'un film pris par un touriste, zone enflammée estimée à plus de 6 hectares).

Quand des pompiers se trouvent sur le passage d'une éruption de feu, ils sont très souvent gravement brûlés ou peuvent même décéder, malgré leur matériel de protection et même s'ils sont dans leurs véhicules. Citons à titre d'exemple les accidents de Cornillon-Confoux en Provence (2000, 2 morts), Palasca en Corse (2000, 2 morts et 5 brûlés graves), Mortágua au Portugal (2005, 4 morts) Guadalaraja en Espagne (2005, 11 morts) et Kornat en Croatie (2007, 12 morts).

Plusieurs phénomènes physiques et chimiques peuvent potentiellement causer ce genre d'évènements (vent, topographie, végétation, accumulation de gaz combustibles, sécheresse, etc.). Des expériences menées au Portugal depuis plusieurs années ont permis de reproduire des éruptions à l'échelle du laboratoire [2] et démontrent un effet de couplage entre la topographie et le feu créant un attachement des flammes au combustible à l'avant du front de feu. Cependant, les connaissances accumulées au niveau du laboratoire et les études des accidents antérieurs ne permettent pas de séparer clairement les causes potentielles au niveau du terrain. L'enjeu scientifique est d'amener des éléments de compréhension des mécanismes de base à l'origine des feux éruptifs afin d'augmenter la sécurité des sapeurs-pompiers face à ces évènements extrêmes.

Les feux couvants

Ces feux sont extrêmes, non pas dans le sens de la vitesse de propagation ou de l'énergie dégagée, mais car ils apparaissent dans des conditions extrêmes de chaleur et de sécheresse et leurs conséquences sont de grande ampleur. Les feux couvants sont des feux sans flamme, se propageant lentement dans le sol (figure 2.b), généralement constitué de tourbe ou d'humus.

Les feux de tourbe ont lieu essentiellement au Canada, en Russie et au Royaume-Uni. Il existe aussi de la tourbe dans les forêts humides équatoriales. Le plus souvent, les feux de tourbe sont allumés par les feux de surface qui se transmettent dans le sol quand il est particulièrement sec. La tourbe est un combustible dont l'épaisseur peut varier de 50 cm à 12 m. Quand elle brûle, elle peut être très difficile à éteindre car les feux peuvent se propager sous le sol en dégageant peu de fumée mais en consommant lentement de grandes quantités de carbone. Ils sont alors très difficiles à localiser et il faut creuser des tranchées ou envoyer des quantités astronomiques d'eau en sous-sol pour les éteindre.

La tourbe contient la même quantité de carbone que l'atmosphère et bien plus que les forêts. On peut donc s'inquiéter de l'impact de ces feux dans le cadre des changements climatiques. Un des exemples les plus marquants de feux de tourbe est celui des feux qui ont fait suite aux incendies de forêt en Indonésie en 1997 lors de l'épisode climatique « El Niño ». Ils ont représenté environ 40 % des émissions globales de CO₂ de l'année [3]. Le deuxième type de feu couvant est celui des feux d'humus. Les couches d'humus sont plus fines que celle de tourbe (de 5 à quelques dizaines de cm), mais ces feux sont également très difficiles à détecter et à éteindre. Ils contribuent aussi à l'érosion et à la stérilisation des sols. Comme, ils durent plus longtemps que les feux de forêt, ils représentent un risque important de nouveaux départs de feux. Ce risque est plutôt faible pour des conditions météorologiques normales, mais il augmente fortement lors d'épisodes de fortes sécheresses. La fréquence de ces feux risque aussi d'augmenter avec les changements climatiques.



Figure 2 : a) Image du feu de Palasca b) Feu couvant de laboratoire (Università di Corsica)

4. Conclusion

Cet article a présenté les mécanismes de base de propagation des feux et deux exemples de feux extrêmes. La recherche sur le comportement des feux est encore jeune et le problème est d'une grande complexité car il implique de nombreux phénomènes physiques et chimiques qui sont très difficiles à caractériser et qui sont intimement couplés. Les chercheurs doivent continuer à développer les connaissances fondamentales car cela permettra d'alimenter la recherche appliquée, qui vise elle à fournir des solutions aux opérationnels de terrain pour leurs activités de lutte et de prévention.

5. Bibliographie

- [1] Simeoni. A. "Comprendre les feux de forêt pour mieux les gérer", dans Strade (Numero Special Festival de Lama), ADECEM/Albiana (Ed.), 2009.
- [2] Viegas D.X. Parametric study of an eruptive fire behaviour model. International Journal of Wildland Fire, 2006, 15(2) : 169-177.
- [3] Page S.E., Siegert F., Rieley J.O., Boehm H.D.V., Jaya A., Limin S. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. Nature, 2002, 420 : 61-63.

Une politique régionale de protection contre les incendies en Corse, le Plan de Protection des Forêts et des Espaces Naturels contre les Incendies (PPFENI : 2006-2012)

C. PERRIN

Direction Départementale des Territoires et de la Mer de la Corse du Sud
Email : claude.perrin@corse-du-sud.gouv.fr

Résumé

La politique de protection contre les incendies de forêts en Corse fait l'objet depuis 2006 d'un plan régional élaboré sous le pilotage du Préfet de Région et approuvé par les collectivités.

Son contenu est le produit d'un travail collectif de l'ensemble des services de l'État et des Collectivités territoriales dédiés à ces missions.

A partir d'un diagnostic (bilan annuel des incendies) et d'une appréciation du contexte géographique et écologique du territoire, six axes de travail principaux (plus 3 axes complémentaires) ont été précisés, pour répondre à trois objectifs réglementairement définis par le code forestier : diminuer le nombre de départs de feux et les superficies brûlées, sécuriser les personnes en milieu naturel, et protéger l'espace urbain et les activités économiques et sociales en milieu naturel.

Des treize départements de l'entente pour la protection de la forêt méditerranéenne, les deux départements de Corse font partie des plus sensibles au risque « incendies de forêts ». C'est pourquoi différentes politiques de recherche et d'expérimentation, de formation et d'information, de communication et d'aménagement et d'équipement du territoire convergent, grâce à l'implication des deux conseils généraux, de la Collectivité Territoriale de Corse et de l'Etat, sur la base de financements croisés intégrant le FEDER.

En six années, le nombre de départs de feux semblent se stabiliser même si chaque année un petit nombre de « grands feux » occasionnent l'essentiel des dommages. De nombreux équipements ou aménagements de Défense des Forêts Contre l'Incendie (DFCI) ont vu le jour et commencent à marquer significativement le territoire : points d'eau et zones d'appui à la lutte en particulier. Le nouveau PPFENI en cours d'élaboration devra poursuivre les objectifs politiques clairement fixés et lever certains blocages juridiques et politiques inhérents à toutes politiques d'aménagements.

Mots clés : incendie / risque / territoire / aménagement / politique / collectif / publique.

1. Introduction

Par arrêté préfectoral du 16 mars 2006, le Préfet de Région a officialisé le Plan de Protection des Forêts et des Espaces Naturels contre les Incendies de Corse.

Mais les réflexions en matière de protection contre les incendies n'ont pas attendu l'année 2006 pour se développer. Les deux départements de Corse se sont dotés dès les années 2000 pour la Haute-Corse et 2001 pour la Corse du Sud, de plans départementaux.

La loi d'orientation forestière du 9 juillet 2001, suite à plusieurs saisons catastrophiques en matière d'incendies de forêt dans les départements méditerranéens, a ouvert la possibilité de mettre en œuvre des outils de planification de plus grande ampleur, et donc d'élaborer un plan régional, après accord des préfets de département.

C'est ce qui fut fait en Corse avec le PPFENI élaboré par les partenaires en formation interdépartementale sous pilotage du Préfet de Région.

Ont ainsi participé à son élaboration : les services de l'Etat (DDAF et DRAAF), l'ONF, les deux SDIS, les deux Conseils Généraux et leurs services des Forestiers Sapeurs et l'OEC.

Deux des principales collectivités territoriales de Corse l'ont approuvé : l'Assemblée de Corse par délibération du 27 janvier 2006 et le Conseil Général de la Corse du Sud par délibération du 23 mai 2005. Plus largement, de nombreuses communes, l'association des maires de Corse du Sud, les deux Sous Commissions Départementales

pour la sécurité contre les risques d'incendie de forêt et le Conseil Economique Social et Culturel de Corse en ont aussi favorablement débattu.

Les objectifs poursuivis par ce plan étaient clairement précisés par l'article R. 321-15 de l'ancien code forestier : « la diminution du nombre d'éclosions de feux de forêts et des superficies brûlées ainsi que la prévention des conséquences des incendies sur les personnes, les biens, les activités économiques et sociales et les milieux naturels ».

Ces éléments sont repris dans la nouvelle mouture du code forestier dans l'article L.133-2.

Le PPFENI, en s'inscrivant dans ce cadre législatif, a fixé pour la Corse 6 axes politiques principaux :

- Diminution du nombre de mises à feux ;
- Réduction des surfaces parcourues par les incendies ;
- Limitation des effets de l'incendie sur les espaces forestiers remarquables ;
- Protection des zones urbanisées ;
- Protection des personnes en milieu naturel ;
- Pérennisation des équipements créés.

ainsi que 3 axes complémentaires :

- Contribution de l'agriculture et de l'aménagement de l'espace ;
- Amélioration de la connaissance du phénomène feu ;
- Aménagement après incendie.

35 fiches action déclinent ces différents axes politiques.

2. Un contexte particulier

Ces orientations ont été fixées à partir d'un contexte environnemental, politique et social marqué par :

- Un couvert végétal combustible important en surface et continu. 80% de la superficie de la Corse est recouverte de végétation sensible à l'éclosion et à la propagation d'un incendie alors qu'en comparaison les autres départements du Sud Est de la France connaissent des taux de 55% ;
- L'absence de grandes coupures agricoles irriguées ou labourées est fortement marquée. Seuls 2,4% du territoire sont occupés par des cultures permanentes ;
- De nombreux espaces naturels remarquables occupent une superficie importante du territoire à relief très accentué ;
- De nombreux espaces littoraux présentent une urbanisation diffuse qui multiplie les impératifs de protection des personnes et des biens et complexifie l'organisation de la lutte contre les incendies ;
- Un tourisme de pleine nature est en plein développement et génère des points de concentration du public en milieu difficile et accidenté et en pleine saison à risque « feux de forêt ».

Les moyens de lutte et notamment les camions citerne feux de forêts (CCFF) sont fortement contingentés malgré une contribution fiscale élevée des citoyens insulaires. En ramenant les superficies à défendre au nombre de véhicules de lutte possédés, on constate qu'un CCFF protège en Corse 7 à 10 fois plus de surface que dans le Var ou les Bouches du Rhône.

La protection contre les incendies fait intervenir en Corse un grand nombre de partenaires institutionnels et administratifs. Aux partenaires habituels rencontrés dans les autres départements méditerranéens se rajoutent la Collectivité Territoriale de Corse et ses offices (OEC, OEHC, ODARC).

Dans ce contexte, le bilan des feux de forêts en Corse est plutôt lourd bien qu'en constante amélioration depuis 2003. Le nombre de feux aux 1000 ha de territoire sensible est le plus fort de France pour les deux départements de la Corse, avant les Bouches du Rhône.

Le phénomène « incendie » est géographiquement fortement concentré (50% des feux sur 10% du territoire).

Entre 1994 et 2010, les causes de feux sont involontaires pour 52,8% de leur nombre, malveillantes pour 42,6% et naturelles (foudre exclusivement) pour 4,6%.

Les grands feux sont toujours présents et l'on note, de manière récurrente depuis 1994, que 0,3% du nombre de feux occasionnent 67% de la superficie annuelle brûlée.

La détection des départs de feux est plutôt efficace en Corse grâce à une forte implication de la population.

3. Les axes politiques du PPFENI

Neuf axes politiques constituent les orientations de la politique de protection contre les incendies pour la région Corse pendant 7 ans.

Chacun d'entre eux définit des modalités d'action dont certaines se déclinent en fiche action induisant la réalisation d'objectifs mesurables grâce à des indicateurs.

Axe 1 : Diminution du nombre de mise à feu

Elle implique tout d'abord une bonne connaissance des causes de feux. Pour cela la base de données « Prométhée » doit être annuellement remplie avec soin avec la participation des forestiers de la DDTM et de l'ONF, des pompiers et des gendarmes.

Des progrès importants en matière de fiabilité et d'exhaustivité ont pu être notés sur la période. La création dans chaque département en 2010 de cellules techniques d'investigation sur les incendies de forêts (forestier/pompier/gendarme) a permis par l'étude particulière de certains départs de feux à la demande du Procureur, d'affiner la connaissance des causes.

Mais il reste encore de nombreux progrès à faire notamment en terme de jonction des bases de données de suivi des interventions pompiers (« systel » pour le SDIS 2A) et « Prométhée ».

A partir de ces données statistiques, chaque grand type de cause doit bénéficier d'actions particulières.

C'est ainsi que les causes de feux d'origine électrique ont conduit les services à travailler étroitement avec EDF. Certaines actions visant à mieux encadrer l'utilisation du feu dans les exploitations agricoles ont permis de réduire les causes de feux pastorales répertoriées.

La communication vis à vis de différents publics (scolaires, automobilistes, ...) est un outil particulièrement utilisé dans ce cadre.

Axe 2 : Réduction des superficies touchées par les incendies

L'ampleur du couvert végétal en Corse susceptible de permettre l'éclosion et la propagation d'un incendie nécessite un équipement et un aménagement du territoire pour tenter de réduire les surfaces incendiées, ainsi que l'adoption de procédures particulières de détection et d'intervention pour les services de lutte.

Plusieurs objectifs sont ainsi poursuivis :

- Le traitement des feux naissants et petits feux induit le positionnement préventif des moyens de lutte sur le territoire permettant de raccourcir les délais d'intervention. Dans la même logique est mis en place un réseau de points d'eau de DFCI (pour camions et hélicoptères), régulièrement réparti le long du réseau routier ;
- La possibilité de lutter contre l'extension des grands feux passe par la création d'ouvrages débroussaillés de type zone d'appui à la lutte (ZAL) susceptibles de permettre aux services de lutte de se positionner face à un feu, en sécurité, pour le stopper ;
- Enfin un réseau de pistes de liaison DFCI doit avoir pour rôle de permettre le déplacement rapide des moyens de lutte pour assurer leur positionnement efficace sur un ouvrage débroussaillé.

L'ensemble de ces équipements/aménagements doit être préalablement réfléchi, d'où la réalisation d'études de type Plan Local de Protection contre les Incendies (PLPI) ou de Protection Rapprochée de Massif Forestier (PRMF), avant tout début de travaux et rassemblant dans une démarche collective l'ensemble des techniciens, des administrations concernées (DDTM, SDIS, Conseil Général, ONF, OEC).

Reste ensuite à faciliter la réalisation de ces équipements et aménagements par les collectivités, soit par intervention directe en régie (services des Forestiers Sapeurs des Conseils Généraux) soit sous la forme de marchés publics de travaux.

Axe 3 : Limitation de l'effet des incendies sur les espaces forestiers remarquables

Un certain nombre d'espaces forestiers répondent à des caractéristiques particulières : fort intérêt écologique et paysager, topographie et relief tourmentés réduisant les possibilités de création d'ouvrages débroussaillés, forte fréquentation touristique engendrant des problématiques de défense des personnes.

La réponse à ces enjeux particuliers nécessite une réflexion soutenue des services techniques dans le cadre des études de PRMF.

Divers concepts sont mis en œuvre visant à minimiser l'impact du feu sur les peuplements forestiers en s'appuyant sur des techniques de brûlage dirigé sous forêts ou l'introduction du pastoralisme.

La gestion de la sécurité du public empruntera à l'axe n° 5 (protection des personnes en milieu naturel) un certain nombre de ses actions.

Axe 4 : Protection des zones urbanisées

Deux grands objectifs sont poursuivis :

- Protéger les personnes et les biens ;
- Libérer des moyens de lutte en protection des zones habitées pour les impliquer dans la lutte effective contre l'incendie.

La mise en œuvre du débroussaillage légal (code forestier) est au cœur de cette problématique.

Différentes mesures sont mises en œuvre pour faciliter l'application par les Maires de cette réglementation.

L'OEC développe depuis plusieurs années une action d'animation auprès des particuliers et d'appui aux élus communaux pour faciliter l'application de la réglementation. Le cas échéant, des opérations de contrôle sont ensuite diligentées par les services de l'Etat (DDTM et ONF).

Axe 5 : Protection des personnes en milieu naturel

Cette question prend de jour en jour plus d'ampleur du fait d'un fort développement des activités de plein air (canyoning, randonnée pédestre et équestre, via ferrata, parc de loisir).

Si un certain nombre d'aménagements dans le milieu naturel (aires de regroupement, ...) peuvent être envisagés, ils trouvent rapidement leur limite.

Les principales modalités d'action s'orientent dorénavant vers l'information du public sur le risque (site internet,

panneaux actualisés, ...) et la fermeture temporaire des massifs en cas de risque avéré.

Axe 6 : pérennisation des équipements

Dans un souci d'efficacité et de bonne gestion de l'argent public, l'ensemble des ouvrages de DFCI créés (pistes, points d'eau, ZAL) doit pouvoir chaque année jouer le rôle qui lui est dévolu.

La pérennisation technique de ces ouvrages est assurée par les services des Forestiers Sapeurs.

Sur le plan foncier la mise en œuvre de servitudes de passage et d'aménagement DFCI est impérative pour éviter toute remise en cause de l'opérationnalité des ouvrages par les propriétaires du fond.

Axes complémentaires.

La contribution de l'agriculture et de l'aménagement de l'espace à la DFCI suscite beaucoup d'intérêts même si paradoxalement les actions réalisées sont peu nombreuses.

Mais il est vrai que les retours d'expérience sur des feux ayant concerné des zones agricoles, comme en 2009 dans la vallée de l'Ortolo, démontrent que l'existence d'une agriculture ne suffit pas à stopper spontanément la propagation des incendies, même si elle en atténue largement la puissance.

La contribution de l'agriculture à la DFCI peut donc se concevoir pour l'entretien des ouvrages de type ZAL, pour réduire la puissance du feu en amont d'une ZAL, pour réduire le nombre d'incendies pastoraux par une utilisation raisonnée et réglementée du feu.

Les autres actions complémentaires visent à améliorer la connaissance du phénomène feu par l'apport de la recherche scientifique (Université de Corse) et à réfléchir à la qualité des aménagements après incendie.

4. Une esquisse de bilan

Alors que s'ouvre depuis le début de l'année 2012 une intense période de réflexion préalable à l'élaboration du PPFENI 2013/2023, il est possible de dresser un premier bilan de 7 ans de mise en œuvre du premier PPFENI.

Les méthodes de travail utilisées dans l'élaboration du document politique puis dans la traduction concrète de son contenu ont créés des habitudes de travail en commun entre les différents services concernés, issus de collectivités diverses (Etat, collectivités locales, établissements publics).

Elles ont aussi conduit à des harmonisations effectives entre services des deux départements de Corse tant du point de vue des méthodes de travail que des résultats sur le plan réglementaire et technique.

Les réalisations sur la période sont importantes.

Sur 24 PLPI prévus, 42% sont approuvés par arrêté préfectoral et 21% en cours de finalisation.

Sur 23 études de PRMF programmées, 43% sont approuvées et 35% en cours de finalisation.

De nombreux aménagements ont été mis en œuvre (points d'eau, ZAL, pistes) par les collectivités et chaque année les services des Forestiers sapeurs programment et réalisent l'entretien des ouvrages créés.

Des campagnes d'incitation à la mise en œuvre du débroussaillage légal, menées par l'OEC, ont concerné un grand nombre de communes. Et les opérations de contrôle ont suivi.

Depuis 2006, 110 millions d'euros ont été dépensés pour la protection contre les incendies, soit 18 millions par an, intégrant le fonctionnement des services des Forestiers sapeurs et des animateurs de débroussaillage de l'OEC.

5. Quel avenir

Le premier semestre 2013 devrait voir aboutir l'élaboration du PPFENI 2013/2023.

Il va très certainement confirmer la mise en œuvre des différents axes mis en lumière dans le premier PPFENI.

Cependant la nécessité de mettre encore plus les élus au centre du dispositif apparaît très clairement. Leur validation des choix techniques portés collectivement par les services est plus que jamais nécessaire.

Certaines incertitudes juridiques, malgré la révision du code forestier au mois de juin 2012, devront être levées notamment en matière de servitude (utilisation renforcée) et de débroussaillage légal (facilités d'application).

Cependant la mise en œuvre d'une politique de protection contre les incendies ne sera possible que si sont maintenues au moins à leur niveau actuel les capacités d'animation et de réalisation des organismes publics concernés.

Le risque incendie dans la Charte forestière du Fium'Orbu

P. PERALDI

Parc Naturel Régional de Corse
Email : parc-fiumorbu@wanadoo.fr

1. Introduction : une charte forestière, outil de concertation locale

Les chartes forestières ont été créées par la loi d'orientation sur la forêt du 9 juillet 2001, texte où apparaît la notion de multifonctionnalité de la forêt, à travers une gestion durable intégrée dans son territoire. Onze ans plus tard, il existe 119 chartes forestières actuellement en cours d'élaboration, de mise en œuvre ou de renouvellement sur l'ensemble du territoire français (plus de cinq mille communes impliquées). Ce succès est probablement dû à cette notion de multifonctionnalité de la forêt, qui permet d'élaborer un programme d'action sur un territoire donné et non pas seulement pour une catégorie d'acteurs. Les frontières entre l'agricole et le forestier, le tourisme et la protection contre l'incendie, la valorisation économique et la préservation de la biodiversité sont transgressées par la concertation généralisée menant à l'élaboration d'une charte forestière. La charte forestière du Fium'Orbu, animée par le Parc Naturel Régional de Corse (PNRC) en collaboration avec l'Office National des Forêts (ONF) et le Centre Régional de la Propriété des Forêts (CRPF), concerne dix communes de Haute-Corse, de Ghisoni au nord à Solaro au sud. Ce territoire assez vaste (près de 50 000 hectares, dont 73% de forêts et maquis) est cohérent dans sa géographie, et est représentatif des différents peuplements de Corse.

2. Une préoccupation prioritaire, une vision abstraite, un discours contradictoire

Lors du premier comité de pilotage, introduisant les travaux d'élaboration de la charte forestière, un premier recueil des préoccupations de chacun quant à l'espace forestier et à ses enjeux a été réalisé. Cela nous a permis de dégager quatre grandes thématiques qui ont ensuite structuré la phase d'animation : les usages de loisirs, la dynamique économique, la préservation de la biodiversité et la prévention des risques. Ce que je vais vous présenter ici est issu de six réunions (comités de pilotage et réunions thématiques, au cours desquels le risque incendie a été abordé) auxquelles ont participé des élus municipaux, des représentants d'associations de propriétaires, l'ONF et le CRPF (co-animateurs), l'Office du Développement Agricole et Rural de la Corse (ODARC), l'Office de l'Environnement de la Corse (OEC), le Conservatoire Botanique National de Corse et la Chambre d'Agriculture. Ce sont donc leurs propos que je rapporte ici, et non les résultats d'une enquête sur un échantillon représentatif. Lorsque l'on parle de risques, le risque incendie est le premier évoqué, et il est considéré comme le plus important. Les locuteurs sont unanimes sur la nécessité de renforcer encore la prévention et l'organisation de la lutte. Mais la plupart ignore l'état des connaissances et les préconisations récentes dans ces domaines, et n'ont donc pas beaucoup d'idées concrètes à avancer. Le consensus se fait aussi sur le sentiment d'être peu impliqués dans les processus de décision par les organismes responsables de la prévention et de la lutte. Comme pour d'autres domaines soumis à de fortes contraintes techniques, ils ont l'impression que les décisions sont imposées d'en haut, et non concertées. Cependant, les acteurs de la prévention et de la lutte constatent, eux, une désaffection des élus aux étapes décisionnaires dans la construction des programmes, malgré une information systématique quant à la tenue des réunions. Et si la nécessité d'agir contre le risque incendie fait l'unanimité, l'inadéquation des équipements existants la fait presque autant... Les espaces et constructions consacrés à la lutte et à la prévention sont rangés en trois catégories dans la plupart des discours (notamment celui des habitants) : les équipements trop contraignants par rapport à l'usage social qui pourrait en être fait (par exemple, la restriction d'accès sur une piste DFCI) ; les équipements ni faits ni à faire, commencés et pas vraiment finis, inutilisables mais qui par leur présence empêche l'attribution de nouveaux fonds ; et enfin les équipements qui ne protègent pas les villages, juste le maquis. Je ne veux pas transformer des opinions en vérités ; mais les deux premières catégories traduisent l'absence de concertation à l'échelle locale avant la programmation de travaux, et la dernière relève d'un manque de connaissance sur les mécanismes de l'incendie en milieu naturel. Ce qui est plus grave, dans certains discours, la pression ressentie des réalisations pour la prévention et la lutte est supérieure à la pression ressentie du risque incendie. Mais il faut rappeler, pour le contexte, qu'à part la commune

de Ghisoni, frappée plus souvent qu'à son tour, la région concernée a été relativement épargnée par les incendies ces dernières années. Enfin, il me semblait intéressant de souligner que le risque incendie n'est évoqué que par rapport aux constructions et usages humains, et jamais par rapport aux habitats naturels, en tant qu'élément cyclique (positif ou négatif) d'un écosystème.

3. Les propositions d'actions : multifonctionnalité des ouvrages de protection et meilleure connaissance de la programmation

La première phase de l'élaboration de la charte forestière a consisté en un recueil de toutes les données disponibles sur l'espace forestier, suivant les problématiques retenues. Il est apparu que les programmes concernant la prévention et la lutte contre l'incendie, en projet ou en cours, couvrent assez bien le territoire de la Charte forestière. Les fiches actions proposées s'orientent donc vers d'autres aspects que la création d'équipements. De façon assez cohérente, les actions proposées se veulent des réponses aux manques évoqués plus haut (manque de concertation et manque de connaissances). Je précise que les propositions d'actions de la charte forestière sont toutes issues des acteurs ; si, en tant que techniciens, nous avons parfois donné notre avis ou dirigé les débats, nous n'avons jamais imposé ou refusé d'action. Une première demande, qui n'apparaît pas comme fiche action mais dans le rendu de l'état des lieux, consiste à cartographier précisément les pistes et équipements, et à préciser pour chacun le statut (propriétaire, gestionnaire, responsable de l'entretien, restriction d'usage, etc.). Trois fiches actions relèvent de l'information des élus et des propriétaires privés : il s'agit de leur adresser systématiquement les programmes de travaux, et de les faire participer mieux (autrement ?) à la planification de ces travaux. Deux fiches actions relèvent de l'accueil du public en forêt : l'une sur une diffusion massive du risque journalier, l'autre pour une réflexion collective sur l'utilisation des pistes DFCI. Enfin, une action pilote, emblématique de la charte forestière du Fium'Orbu, combine la prévention contre le risque incendie avec la valorisation économique de la ressource forestière et l'intégration sociale. Le village d'Ania et les deux milles hectares de forêts alentours appartiennent en indivision aux héritiers des 27 familles qui y résidaient à la fin du XIXème siècle. Malgré le soin apporté par les habitants à débroussailler la bande des 50 mètres, le village est cerné des ronciers et de pins maritimes, au lieu des vergers, châtaigneraies et chênaies d'il y a 50 ans. Nous avons donc le projet de demander, à travers la Communauté de Communes Fium'Orbu-Castellu, un financement pour une interface supplémentaire de 50 mètres, qui servirait de premier aménagement. Parallèlement, les indivisaires auraient la possibilité de se réunir en un groupement forestier (ou autre structure). Toutes les conditions seraient alors réunies pour gérer durablement l'espace forestier à leur disposition, en maintenant par la gestion un espace de sécurité autour du village. La gestion d'un éventuel après-incendie n'a jamais été abordée.

4. Conclusion

Les premiers travaux réalisés pour l'élaboration de la Charte forestière du Fium'Orbu donnent quelques pistes pour une meilleure implication locale dans les programmations de la prévention et de la lutte contre l'incendie. Cette implication apparaît essentielle alors que la tendance est à la relocalisation des décisions en matière de prévention des risques naturels, parallèlement à la décentralisation.

5. Les fiches actions de la prévention du risque incendie dans la Charte forestière du Fium'Orbu

- V Prévenir les risques en forêt
- V.1 Prévenir les risques d'incendies de forêt
- V.1.P Réaliser une interface de protection contre l'incendie autour du village d'Ania (commune de Serra di Fium'Orbu)
- V.1.1 Elargir la diffusion du risque météo quotidien et du risque d'incendies aux offices de tourisme, mairies et points d'accueil
- V.1.2 Mieux associer les élus aux documents de planification DFCI
- V.1.3 Mieux associer les élus aux réalisations des travaux des forestiers sapeurs
- V.1.4 Mieux informer les propriétaires forestiers des projets de travaux DFCI et les associer en amont
- V.1.5 Mieux organiser l'utilisation des pistes DFCI

Principaux résultats du projet Proterina-C

P.-A. SANTONI (1), T. BARBONI (1), P. CARMELLE (2)

(1)UMR CNRS 6134 SPE Université de Corse, Corte 20250, France

(2)ONF DR Corse- SEAT DFCI, 20000 AJACCIO

Email : santoni@univ-corse.fr

Résumé

Le projet Proterina-C a débuté en Mai 2009 et s'est achevé en Juin 2012. Il s'agit d'un projet transfrontalier entre la Corse, la Sardaigne et la Ligurie qui a concerné l'étude des risques hydrogéologique et incendie de végétation. La Corse représentée par l'université de Corse, avec l'appui technique de l'Office National des Forêts et de l'Office de l'Environnement de la Corse a été concernée par le risque incendie de végétation. Ce projet a comporté différentes activités parmi lesquelles :

- des travaux de recherche portant sur la détermination de la puissance des incendies de végétation, la caractérisation de la végétation et la simulation des incendies de végétation. Ces travaux scientifiques se sont articulés autour des laboratoires de recherche de l'université de Corse, de l'université de Sassari et du CNR IBIMET.
- la mise en œuvre de projets pilotes de prévision et prévention du risque : utilisation de la technique du brûlage dirigé en Ligurie et en Sardaigne pour réduire la charge combustible, localisation des infrastructures pour la prévision des risques. Les projets pilotes ont été coordonnés en Corse par l'Office National des Forêts
- la sensibilisation des populations soumises au risque, actions coordonnées en Corse par l'Office de l'Environnement.

Mots clefs : puissance du feu, caractérisation de la végétation, simulation d'incendies, projets pilotes, sensibilisation au risque.

1. Introduction

PROTERINA-C est un contrat de recherche obtenu dans le cadre du Programme Opérationnel Italie-France Maritime 2007-2013. Il vise à évaluer l'impact de la variabilité des conditions climatiques sur les risques incendie et hydrogéologique dans les espaces naturels et urbains pour les régions Corse, Ligurie et Sardaigne. L'objectif global est de fournir à ces régions, qui ont de fortes similitudes, des outils communs pour la gestion des risques prenant en compte la variabilité du climat. Les bénéficiaires finaux sont les gouvernements et administrations locales impliqués dans la prévention des risques. Ce projet comporte différentes activités parmi lesquelles :

- Des travaux de recherche portant sur : l'étude de la variabilité des conditions climatiques et leur impact sur la végétation, la détermination de la puissance des incendies de végétation, la caractérisation de la végétation et la simulation des incendies de végétation. Ces travaux scientifiques s'articulent autour des laboratoires de recherche de l'université de Corse, de l'université de Sassari, du CNR IBIMET et de l'ARPA Sardaigne. Ils sont conduits pour la Corse en partenariat avec le Groupe de Travail Inter-service représenté par l'Office National des Forêts et l'Office de l'Environnement de la Corse.
- La mise en œuvre d'un outil commun pour quantifier le risque incendie dans les trois régions partenaires du projet. L'environnement RISICO développé par la région Ligurie est appliqué dans certaines zones sélectionnées et présentant un intérêt pour les régions concernées.
- La mise en œuvre de projets pilotes de prévision et prévention du risque : utilisation de la technique du brûlage dirigé en Ligurie et en Sardaigne pour réduire la charge combustible, localisation des infrastructures pour la prévision des risques, définition de pratiques durables d'utilisation des terres.
- La sensibilisation des populations soumises au risque et la formation. Les actions de sensibilisation sont coordonnées en Corse par l'Office de l'Environnement de la Corse. Les autorités locales et les organisations bénévoles sont impliquées par des programmes de formation. Une formation au brûlage dirigée a été proposée aux partenaires italiens par l'Office National des Forêts.
- La diffusion des connaissances. Des workshops sont organisés pour la diffusion des résultats intermédiaires et finaux. Des ateliers thématiques, et des publications conjointes sont également prévus.

PROTERINA-C est un projet intégré et à ce titre comporte de nombreuses phases qu'il est impossible de détailler dans cette communication. Cet article décrira donc quelques résultats de la phase 3 dédiées aux activités de recherche. Les autres résultats des phases 3, 6 et 7 seront présentés à l'oral lors de la journée thématique.

2. Les différentes phases du programme et les intervenants de la région Corse

Les différentes phases du programme sont :

- Phase 1 – Gestion financière et administrative du projet
- Phase 2 – Impact de la variabilité des conditions climatiques
- Phase 3 – Modèles à l'échelle régionale (modèles de risques et modèles de propagation)
- Phase 4 – Partage des procédures d'analyse du risque
- Phase 5 – Acquisition d'une plateforme opérationnelle (Sardaigne)
- Phase 6 – Projets pilote sur les zones à risque
- Phase 7 – Campagnes de communication à la population
- Phase 8 – Programmes de formation
- Phase 9 – Communication et meetings

Les intervenants en région Corse sont :

pour l'Université de Corse : Jacques-Henri Balbi, Toussaint Barboni, Frédéric Bosseur, Dominique Cancellieri, Lila Ferrat, Jean-Baptiste Filippi, Eric Leoni, Valérie Leroy, Thierry Marcelli, Frédéric Morandini, Jean-Louis Rossi, Lucile Rossi et Paul-Antoine Santoni.

pour l'Office de l'Environnement de la Corse : Pascal Luciani et Laetitia Bozzi (OEC).

pour l'Office National des forêts : Philippe Caramelle.

3. Principaux résultats de la phase 3

La mesure de la puissance à l'échelle du laboratoire

L'objectif de cette activité est de fournir un modèle pour calculer la puissance linéaire des feux. Cette étude comporte en trois étapes :

Une méthode basée sur la Calorimétrie à Consommation d'oxygène (CCO) développée pour mesurer la puissance linéaire de feux stationnaires et instationnaires à l'échelle du laboratoire. Cette approche permet de fournir des valeurs de référence pour les puissances linéaire dans le cas de différents combustibles.

Le test de la formulation de Byram qui permet d'estimer la puissance des feux stationnaires par comparaison avec les données obtenues par CCO.

Le développement d'une autre formulation baptisée approche "taux de combustion" pour estimer la puissance des feux instationnaires.

Le concept de puissance linéaire fut développé par George Byram dans les années 50. Cette puissance couramment appelée puissance de Byram correspond à l'énergie dégagée par unité de temps, par unité de longueur du front de feu, indépendamment de sa profondeur. Elle est obtenue par :

$$I_B = Hwr(1)$$

où I_B (kW.m⁻¹) est la puissance linéaire, H (kJ.kg⁻¹) est l'énergie disponible dans le combustible, w (kg.m⁻²) est la charge de combustible consommée dans la zone active du front de feu et r (m.s⁻¹) est la vitesse de propagation du feu. La puissance linéaire est une mesure très utilisée en pyrologie forestière. Elle permet d'évaluer les effets des aménagements forestiers sur le comportement du feu, d'établir des limites pour la conduite des brûlages dirigés et d'évaluer l'impact des feux sur les écosystèmes. Elle est également utilisée comme indicateur pour classer les complexes végétaux en terme de risque ainsi que pour guider les activités de lutte contre les feux. Cependant, il faut être prudent dans ce cas car les résultats obtenus pour une végétation spécifique ne peuvent pas être généralisés à différentes structures végétales.

Bien que la puissance linéaire soit largement utilisée en pyrologie forestière comme détaillé ci-dessus, cette grandeur a peu été utilisée pour tester les nouvelles générations de modèle physique et de modèle détaillé de propagation du feu développés ces dix dernières années. Ces modèles ont été testés le plus souvent par rapport à des données comportementales et géométriques telles que la vitesse de propagation et la hauteur visible de flamme. Les comparaisons avec les mesures de puissance linéaire restent marginales. La raison d'une si faible utilisation de la puissance linéaire par les modélisateurs est probablement due à la difficulté rencontrée pour mesurer précisément cette grandeur et ce, même à l'échelle du laboratoire. Comme la puissance linéaire est en général obtenue à partir d'une estimation de l'énergie disponible par unité de surface dans les végétaux et à partir d'une estimation de la vitesse de propagation, il est difficile de dire à quel point ces puissances calculées sont représentatives des puissances réelles. Cependant, cette quantité contient en elle la plus grande part de la physique impliquée dans la propagation des feux. On peut en effet considérer que la puissance linéaire ainsi que la vitesse de propagation et la forme d'un front de feu représentent les grandeurs les plus pertinentes pour tester les modèles de propagation (des modèles empiriques aux modèles détaillés). Il faut cependant être prudent dans le cas de ces comparaisons car peu d'études ont été réalisées pour comprendre cette quantité.

Le but de notre étude est donc de comprendre la puissance linéaire à l'échelle du laboratoire au moyen de la Calorimétrie par Consommation d'Oxygène (CCO) et de fournir un modèle pour calculer cette grandeur. La CCO a été appliquée avec succès dans la communauté scientifique du risque incendie. Elle est utilisée ici pour comprendre la dynamique de propagation des feux au travers de litières. Nous avons utilisé un calorimètre à grande échelle (CGE) pour mesurer la puissance d'un front de feu. La terminologie anglo-saxonne consacrée est

Heat Release Rate. Le terme HRR sera utilisé dans la suite pour la puissance. Le HRR mesuré correspond directement à la puissance linéaire pour des front de feu de 1 m de large étudiés dans le CGE. Le HRR est le paramètre le plus important pour la compréhension des processus de combustion et du comportement au feu d'un combustible. La figure 1 présente le CGE avec un banc de combustion à l'intérieur. La perte de masse est mesurée et les gaz d'extraction sont analysés en composition, température, épaisseur optique et vitesse d'écoulement (sonde de Mc Caffrey). Le HRR est calculé à partir de ces valeurs mesurées en un point précis du système d'extraction. De façon à valider l'ensemble de l'installation et à réduire les incertitudes de mesure, une calibration par un brûleur au propane est réalisé.

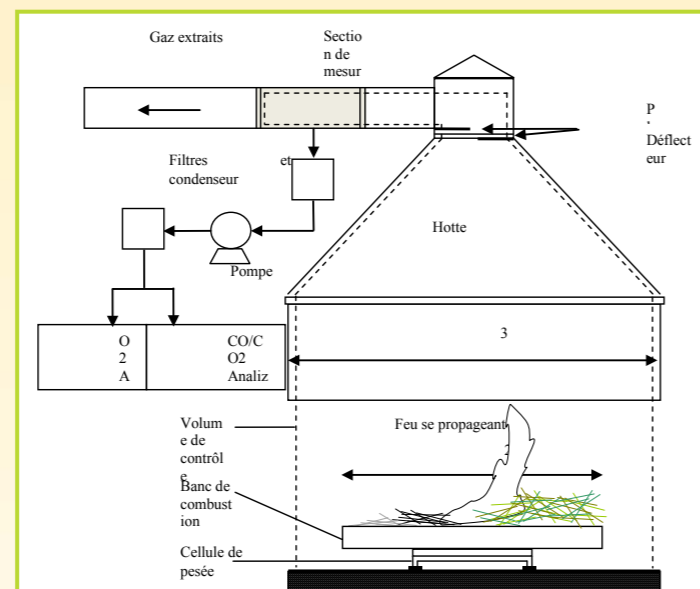


Figure 1 : Schéma du calorimètre à grande échelle avec le banc de combustion.

Les figures 2 et 3 montrent des exemples de courbes de puissance linéaire pour des feux se propageant au travers de litières d'aiguilles de PP pour deux charges (0.6 kg.m⁻² et 1.2 kg.m⁻²). Les pertes de masse correspondantes au cours du temps sont superposées sur les courbes de HRR. Comme les fronts de feu faisaient 1 m de large, la valeur de HRR est égale à la puissance linéaire (kW.m⁻¹). Pour toutes les expériences, nous avons observé un premier pic de HRR à approximativement 40 kW. Il correspond à la puissance dégagée par la combustion de l'alcool durant la phase d'allumage. Puis, en fonction de la charge, nous observons qu'un état quasi-stationnaire est atteint plus ou moins rapidement. Plus la charge est élevée et moins cet état est atteint rapidement. Cependant, l'état quasi-stationnaire dure suffisamment pour nous permettre de calculer des quantités moyennes pertinentes pour la vitesse de propagation, la perte de masse et le HRR.

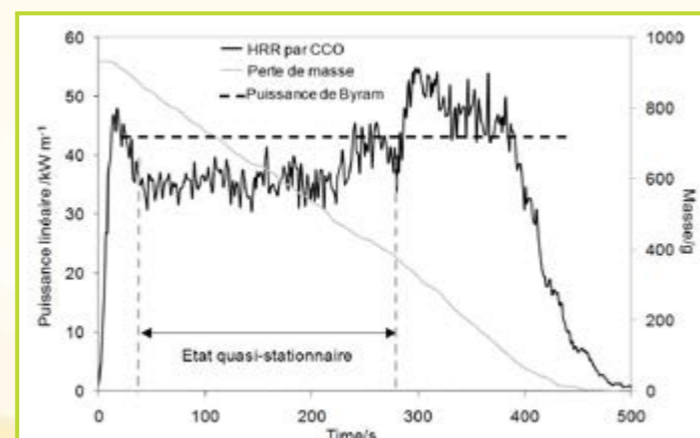


Figure 2 : Puissance linéaire et perte de masse pour un feu au travers d'une litière d'aiguilles de PP (1 m x 1.5 m) pour une charge de 0.6 kg.m⁻².

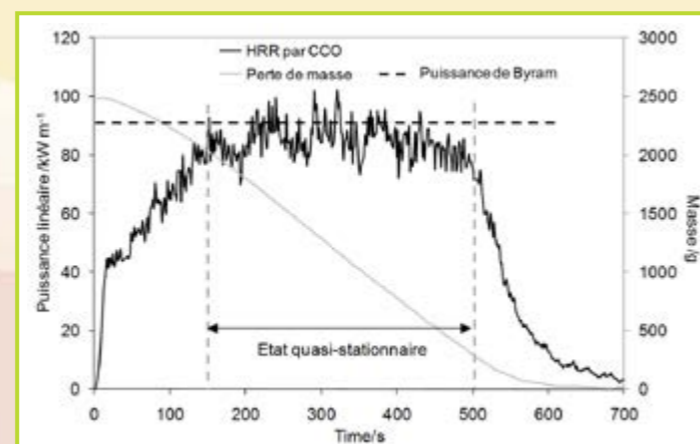


Figure 3 : Puissance linéaire et perte de masse pour un feu au travers d'une litière d'aiguilles de PP (1 m x 2 m) pour une charge de 1.2 kg.m⁻².

La mesure de la puissance à l'échelle du terrain

Des campagnes de brûlages expérimentaux ont été organisées en automne 2009 et en automne 2010 afin de mesurer la puissance linéaire de feux à l'échelle du terrain. Un brûlage a été réalisé en Octobre 2009 et deux en Novembre 2010. Le site expérimental est situé sur la commune de Letia en Corse du sud à 1410 mètres d'altitude. Le site expérimental a été choisi en accord avec les Forestiers Sapeurs du Conseil Général de la Corse du Sud et le Parc Naturel Régional de la Corse. Les raisons principales ayant conduit au choix de ce site sont les suivantes : l'homogénéité de la végétation essentiellement composée d'une lande de genêt (*Genista Salzmannii*), un vent dominant stable, un intérêt sociétal dans le cadre des aménagements cynégétiques. Les parcelles associées aux trois expériences sont présentées sur les figures 4 et 5.

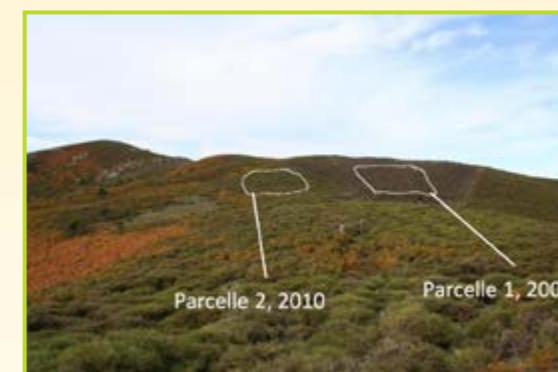


Figure 4 : parcelles 1 et 2



Figure 5 : parcelles 2 et 3

Le principe général de ces expériences consiste à réaliser un allumage en ligne et à suivre la propagation du front de feu par un ensemble de moyens de mesure disposés sur le terrain. Une partie du dispositif expérimental déployé pour la première expérience réalisée en 2009 est représenté sur la figure 6. La figure 7 montre l'allumage en ligne.



Figure 6 : Dispositif expérimental pour l'expérience de 2009.



Figure 7 : Début de la propagation en ligne après l'allumage.

Le suivi de la propagation du front de feu concerne essentiellement la détermination des grandeurs liées à sa dynamique : vitesse de propagation, longueur et inclinaison des flammes. Les données environnementales (température et humidité de l'air, vitesse et orientation du vent) sont également mesurées. La topographie du terrain est relevée et la végétation est caractérisée : PCI du vivant et du mort, humidité et charge par taille de particule (vivant et mort, 0-2mm, 2-6mm et 6-25 mm pour le mort). La figure 8 illustre le découpage par taille de particules.

Les résultats de la caractérisation et des mesures de puissances seront présentés lors de la conférence.



Figure 8 : Particules de diamètre 0-2mm vivantes (à gauche) et mortes (à droite)

La reconstruction et la simulation des incendies

Huit incendies ont été reconstruits en Corse et Sardaigne puis simulés avec les logiciels de propagation Farsite et Forefire. La reconstruction consiste à établir l'historique de la propagation, à cartographier la végétation avant l'incendie, à analyser les actions de lutte, à recueillir les données météorologiques et à établir un modèle numérique de terrain. Cette partie présente le cas d'étude de l'incendie dit de Favone (Figure 9) qui s'est produit en Corse du Sud en juillet 2009.



Figure 9 : Topographie, périmètre du feu et typologie végétale pour le feu de Favone



Figure 10 : Périmètres du feu prédits par Forefire pour l'incendie de Favone (intervalle de temps de 10 min).

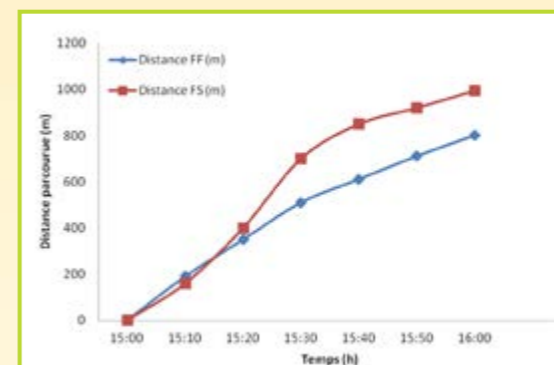


Figure 11 : Distances parcourues au cours du temps le long de l'axe de propagation, prédites par Forefire (FF) et Farsite (FS) pour l'incendie de Favone.

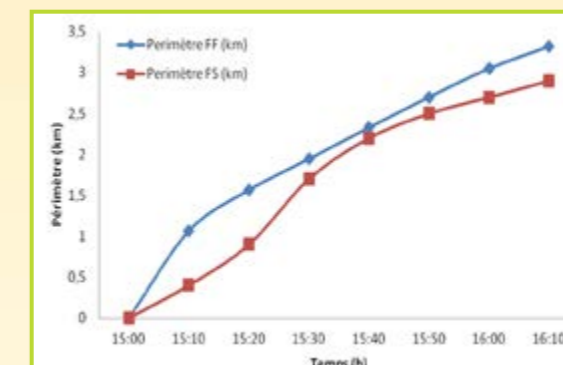


Figure 12 : Périmètres prédits au cours du temps par Forefire (FF) et Farsite (FS) pour l'incendie de Favone.

4. Conclusion

Ce projet a permis de nombreux échanges entre les régions Corse, Ligurie et Sardaigne. La méthodologie de caractérisation de la végétation a été définie en commun avec les partenaires italiens. Certaines typologies végétales de la Corse et de la Sardaigne ont ainsi pu être caractérisées avec la même méthodologie. Une méthodologie commune a également été mise au point pour reconstruire les incendies passés. Ainsi, huit incendies pour la Corse et l'Italie ont été reconstruits et les simulateurs d'incendie Farsite et Forefire ont pu être testés et comparés sur ces incendies. Des formations ont été dispensées par l'Office National des forêts à des personnels de la Protection Civile Italienne en matière de brûlage dirigé. Un outil de prédiction du risque incendie a été validé pour l'Italie (RISICO). Des plaquettes de sensibilisation du public au risque incendie ont été éditées dans les trois régions. De nombreux projets pilotes ont pu être menés en Corse et en Italie. Enfin, plusieurs workshops ont permis de faire la restitution des travaux. PROTERINA-C a permis de créer un partenariat solide entre les trois régions. Une demande de poursuite du projet pour la période 2013-2015 a été déposée en juin 2012.

5. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet PROTERINA-C financé par l'Union Européenne dans la thématique 3 du Programme Opérationnel Italie/France Maritime 2007-2013, contrat numéro: G25I08000120007.

Potentialités offertes par la vision pour le développement d'instruments de mesure dédiés aux feux de forêt

L. ROSSI ⁽¹⁾, M. AKLHOUI ⁽²⁾, A. PIERI ⁽²⁾, Y. TISON ⁽¹⁾

(1)UMR CNRS 6134 SPE, Université de Corse, 20250 Corte, France;

(2)CRVI, 205, rue Mgr-Bourget, Lévis, Québec, G6V 6Z9, Canada

Email : lrossi@univ-corse.fr

Résumé

Pour lutter contre les feux de forêt, des actions de gestion, de prévention et de lutte sont réalisées. L'efficacité de ces trois types d'action est liée à la connaissance des phénomènes qui interviennent lors de la propagation des feux et à la capacité d'anticiper leurs comportements. Les feux en propagation sont caractérisés par l'évolution temporelle de leur position, vitesse, hauteur, surface et volume. Actuellement, il n'existe pas de dispositifs commerciaux permettant la mesure des caractéristiques géométriques des feux en propagation. Depuis une dizaine d'années, des recherches sont réalisées en traitement d'images et en vision pour développer de tels systèmes. Trois familles de systèmes sont apparues : la première est dédiée aux feux se propageant en laboratoire. Elle utilise des informations 2D et ne permet l'estimation que d'un nombre restreint de caractéristiques. La deuxième est dédiée aux feux se propageant à l'extérieur sur de grands terrains de pente uniforme aménagés. Elle utilise des méthodes de traitement d'images et de vision et permet l'obtention d'un modèle de perception 3D du feu à partir d'information 2D. Ces méthodes nécessitent le positionnement sur le terrain de repères de position et de hauteur et sont difficilement transposables sur différentes configurations de terrain ; d'autre part, elles ne permettent pas l'estimation de la surface et du volume d'un feu. Une troisième famille de systèmes utilise la stéréovision pour obtenir un ensemble de points tridimensionnels de feu à partir desquels les caractéristiques géométriques des feux sont estimées. Cet article présente ces différents travaux de recherche.

Mots clefs : Feux de forêt, détection précoce, suivi, outil de métrologie, traitement d'image, vision

1. Introduction

Les feux de forêt représentent un risque majeur pour de nombreux pays dans le monde. Chaque année, 10000km² de végétation sont détruites en Europe (notamment en France, Espagne, Grèce et Portugal) et jusqu'à 100000km² en Amérique du Nord et en Russie. Les feux provoquent des dégâts environnementaux (déforestation et désertification, pollution de l'air, émissions de CO₂ dans l'atmosphère qui représentent 20 % des émissions totales, remise en circulation de métaux lourds et de radionucléides), des pertes économiques (destruction d'habitats et de moyens de lutte) et des pertes humaines parmi le public et les pompiers [1-3]. La situation est tellement dramatique que l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a demandé aux gouvernements de tous les pays de prendre des mesures pour une meilleure prévention, compréhension et lutte des feux de forêt [4].

Pour lutter contre ce danger, des actions de gestion, de prévention et de lutte sont réalisées. L'efficacité de ces trois types d'action est liée à la connaissance des phénomènes qui interviennent lors de la propagation des feux et à l'amélioration des modèles de comportement. De nombreux travaux sont réalisés depuis plus de cinquante ans pour prédire les principales caractéristiques des feux de forêt. Des modèles mathématiques décrivent la propagation d'incendies de forêt ; ils ont besoin d'informations telles que la position du front de feu, sa vitesse, sa hauteur, sa surface et son inclinaison [5-14]. Le dégagement de chaleur par transfert radiatif est le mécanisme principal de transfert de chaleur dans les feux de forêt. Il est modélisé pour établir notamment les distances de sécurité des professionnels de lutte [15-17]. Il existe différents modèles simplifiés de flamme radiative. Certains modèles utilisent une approche de surface radiative [18] : le flux de chaleur sur une cible donnée dépend de l'émissivité de la flamme et du facteur de forme entre la surface de la flamme et la cible. D'autres modèles considèrent la flamme comme une source volumétrique [19]. Pour ces derniers, il est donc nécessaire de déterminer le volume global du feu.

Des études sur la modélisation des feux de forêt sont réalisées au sein de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) "Science Pour l'Environnement" 6134 de l'Université de Corse et du CNRS depuis une quinzaine d'années [20-27].

L'objectif à long terme est le développement d'un simulateur de propagation des feux de forêt utilisable comme un outil d'aide à la décision dans la lutte contre les feux de forêt, de formation des professionnels de lutte (outils de simulations opérationnelles) et d'aménagement des espaces naturels.

Depuis 2004, les membres du projet « Feux de forêt » de l'UMR CNRS SPE 6134 - Université de Corse réalisent des expérimentations de propagation de feux en laboratoire (Figure 1) et en extérieur (Figure 2). Ces expériences permettent d'obtenir des données expérimentales afin de mieux comprendre les phénomènes intervenant au cours de la propagation des feux de végétation et d'améliorer et/ou valider les modèles de comportement qu'ils ont développés.



Figure 1 : Feu en laboratoire se propageant sur un plan incliné



Figure 2 : Feu en semi-terrain réalisé sur le plateau technique

2. Mesure de caractéristiques géométriques des feux en propagation

2.1 Caractéristiques géométriques de feux en propagation

Un premier ensemble de caractéristiques géométriques est présenté en figure 3. Leur estimation peut être faite à partir de traitement d'images prises de côté par rapport à la direction de propagation du feu.

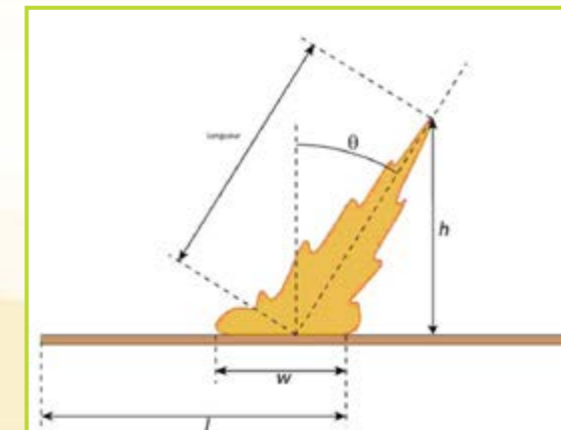


Figure 3 : Vue de côté d'un feu; description des caractéristiques géométriques d'un feu : position du point au sol le plus avancé du front (l), largeur du front (w), hauteur (h) et inclinaison par rapport à la normale au plan de propagation du feu (θ)

D'autres informations sont également importantes pour caractériser un feu en évolution. Il s'agit de la position au sol du front de feu, de la vitesse de chacun des points et de leur hauteur, de la surface et du volume du feu. Ces données nécessitent des informations tridimensionnelles (Figure 4).

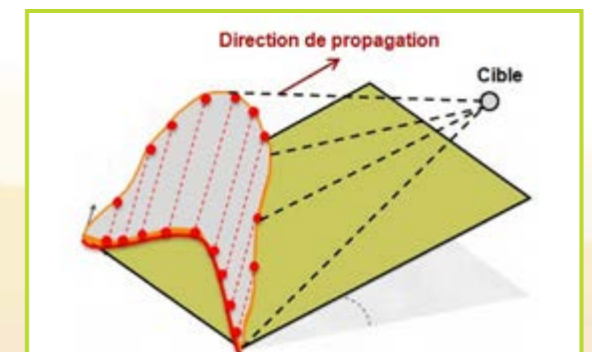


Figure 4 : Front de feu sur un terrain et/ou en pente en présence de vent

2.2 Etat de l'art

Depuis une dizaine d'années, des recherches sont réalisées en traitement d'images et en vision pour développer des systèmes permettant la mesure des caractéristiques géométriques des feux en propagation. Pastor et al. [28] proposent une méthode dédiée aux expériences de propagation de feux faites en laboratoire sur une surface plate. Une caméra est utilisée pour suivre l'évolution temporelle du front de feu linéaire et calculer sa vitesse de propagation. Les auteurs utilisent quatre points de calibration positionnés aux extrémités de la surface de

propagation rectangulaire dont les dimensions sont connues. Cette méthode est limitée à des surfaces planes sur lesquelles se propagent des fronts linéaires. Martinez-de Dios et al. [29] ont développé un système pour le suivi de feux de forme curviligne obtenus sur un plateau incliné. Deux caméras positionnées respectivement en face et sur le côté par rapport à la direction de propagation du feu sont utilisées. La méthode développée exploite des informations 2D et ne peut pas estimer des informations pour l'ensemble des points du front. Seule la hauteur du point le plus avancé du front de feu et son inclinaison sont obtenues à partir des images acquises par la caméra latérale et la vitesse de propagation est calculée à partir de la vue de face du feu. Des techniques de vision par ordinateur sont également utilisées pour suivre les feux de végétation dans les travaux de Martinez et al. [30]. Le système calcule un modèle de perception tridimensionnel d'un feu en propagation à partir de vues complémentaires qui incluent une vision aérienne. Des informations issues de différents capteurs tels que des capteurs de télémétrie et des systèmes de localisation GPS sont utilisées. Cette méthode nécessite le positionnement sur le terrain de repères artificiels ou naturels (arbres ou camions de pompiers) pour réaliser la calibration des différentes caméras. De plus, le matériel utilisé est onéreux et le procédé développé n'est pas applicable pour le suivi de feux à l'échelle du semi-terrain ou du laboratoire.

2.3 Système de mesure développé au sein de l'UMR CNRS 6134 SPE – Université de Corse

En collaboration avec le Centre de Robotique et de Vision Industrielles de Lévis (Canada), les chercheurs de l'UMR CNRS 6134 SPE ont développé des systèmes et procédures basés sur la stéréovision pour le suivi des caractéristiques géométriques des feux en propagation en laboratoire et en extérieur [31-33]. Ces dispositifs ne nécessitent pas le positionnement de repères d'orthogonalité ou de hauteur sur le terrain, ni la connaissance de la topographie de la surface de propagation du feu. Les travaux ont été développés avec des caméras Bumblebee XB3 de chez PT Grey [34] qui comprennent trois caméras couleur rigidement liées (Figure 5). Ces caméras travaillent dans le domaine du visible et ont une focale fixe de 3,8 mm.

Des méthodes utilisant la stéréovision ont été développées afin de reconstruire en trois dimensions les feux et d'en extraire leurs caractéristiques géométriques (Figure 6)



Figure 5 : Caméra Bumblebee XB3

Un dispositif composé de deux caméras XB3 travaillant dans le domaine du visible a été testé sur des feux expérimentaux d'environ 20 m de large, 3 m de haut et se propageant sur une vingtaine de mètres (Figure 7).

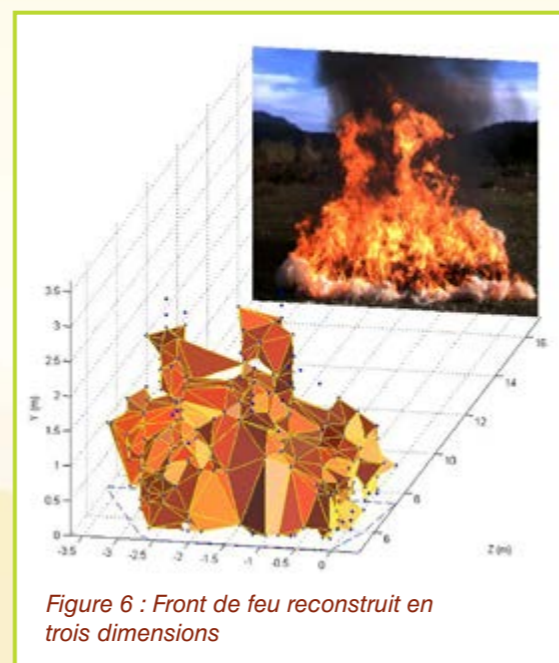


Figure 6 : Front de feu reconstruit en trois dimensions



Figure 7 : Vue générale d'un feu expérimental réalisé sur la commune de Letia (Corse du Sud, France) en 2012 et les positions de deux systèmes de stéréovision (cercles)

A partir de ce dispositif, des caractéristiques géométriques de feu telles que sa position, sa vitesse, sa hauteur, son inclinaison, sa surface ont été estimées (Figure 8) [35].

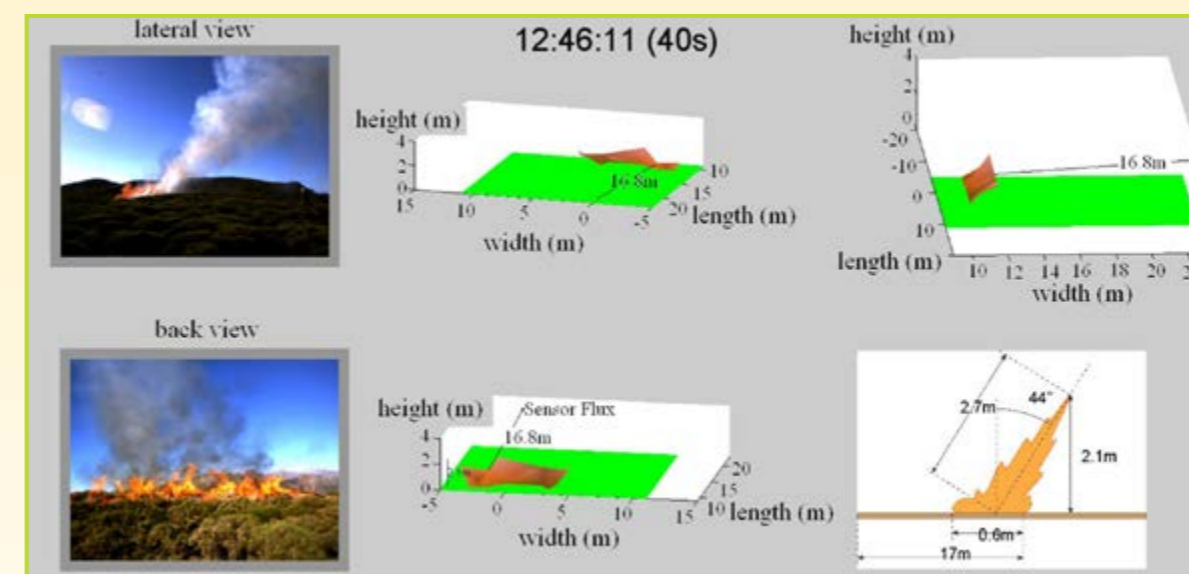


Figure 8 : Caractéristiques géométriques de feu obtenues à un instant donné

Le volume du feu en propagation est une caractéristique importante qui donne des informations sur le comportement du feu. Pour l'estimer, il est nécessaire de calculer une forme tridimensionnelle globale du feu. Ceci nécessite la projection dans un repère unique des formes 3D obtenues depuis plusieurs systèmes de stéréovision positionnés sur le terrain de sorte d'obtenir des vues complémentaires du feu.

Un point de vue important est la position en face du front de feu qui correspond à l'endroit où les fumées se propagent. A cet endroit, les images obtenues dans le visible ne permettent pas de distinguer les zones de feu qui sont masquées par la fumée. Il est nécessaire alors d'utiliser des caméras travaillant dans le domaine infrarouge pour dépasser ce problème.

3. Conclusion

Dans ce travail, des méthodes de traitement d'image et vision ont été présentées pour la mesure de caractéristiques géométriques de feux en propagation. Cette recherche est relativement récente et a débuté il y a moins de dix ans. Des travaux en stéréovision sont actuellement menés au sein de l'UMR CNRS 6134 SPE afin de développer un dispositif composé de plusieurs systèmes de stéréovision répartis sur le terrain afin de suivre l'évolution temporelle de caractéristiques de feux de végétation. Des systèmes utilisant des caméras travaillant dans le domaine du visible ont été développés ; des travaux sont actuellement menés pour utiliser des dispositifs comptant des caméras travaillant dans le visible et l'infrarouge.

4. Références

- [1] Fao, situation des forêts du monde 2011. <http://www.fao.org/docrep/013/i2000f/i2000f00.htm>.
- [2] Fao, evaluation des ressources forestières mondiales 2010. <http://www.fao.org/docrep/013/i1757f/i1757f00.htm>
- [3] WWF the amazon's vicious cycles. <http://wwf.panda.org/index.cfm?uNewsID=118741>.
- [4] Fao 2007 wildfire management, a burning issue for livelihoods and land-use. <http://www.fao.org/newsroom/en/news/2007/1000570/index.html>
- [5] McArthur A. G. Weather and grassland fire behavior.
- [6] R. C. Rothermel. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service Research, paper INT-115, 1972.
- [7] Larini M., Gruzin F., and Zverev V. Mathematical modelling of the spreading of high level forest fires. Sov. Phys. Dokl, 28, 1983.
- [8] F. A. Albin. A model for fire spread in wildland fuels by radiation. Combust. Sci. and Tech, 42, 1984.

- [9] A. M. Grishin. Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. in F A Albin (Ed) (Toms : Toms State University Publishing House), 1997.
- [10] R. O. Weber. Modelling fire spread through fuel beds. Proc. Energy Combust. Sci., 17, 1990.
- [11] D. R. Weise and G. S. Bigings. Effects of wind velocity and slope on flame properties. Can. J. Forest Res., 26(10), 1996.
- [12] J. M. C. Mendes-Lopes, J. M. P. Ventura, and J. M. P. Amaral. Rate of spread and flame characteristics in a bed of pine needles. Proceedings of the III International Conference on Fire Research, 1, 1998.
- [13] B. Porterie, D. Morvan, J. C. Loraud, and M. Larini. Fire spread through fuel beds: Modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics. Physics of Fluids, 12, 2000.
- [14] W. R. Catchpole, E. A. Catchpole, B. W. Bulter, R. C. Rothermel, G. A. Morris, and D. J. Latham. Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. Combust Sci. techno, 131, 1998.
- [15] B. W. Butler and J. D. Cohen. Firefighter safety zones: a theoretical model based on radiative heating. Int. J. Wildland Fire, 8, 1998.
- [16] P. K. Raj. A review of the criteria for people exposure to radiant heat flux from fires. Journal of Hazardous Materials, 159, 2008.
- [17] L. Zarate, J. Arnaldos, and J. Casal. Establishing safety distances for wildland fires. Fire Saf, 43, 2008.
- [18] A. L. Sullivan, P. F. Ellis, and I. K. Knight. A review of radiant heat flux models used in bush fire applications. Int. J. Wildland Fire, 12, 2003.
- [19] R. Siegel and J. Howell. Thermal radiation heat transfer. fourth edition, 2002.
- [20] P. A. Santoni and J. H. Balbi. Modelling of two-dimensional flame spread across a sloping fuel bed. Fire Safety, 31, 1998. 38.
- [21] F. Morandini, P.A. Santoni, and Balbi J.H. The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope. Fire Safety, 36, 2001.
- [22] A. Simeoni, P.A. Santoni, M. Larini, and J. H. Balbi. Reduction of a multiphase formulation to include a simplified flow in a semi physical model of fire spread across a fuel bed. Int. J. Thermal Sci., 42, 2003.
- [23] T. Marcelli, P. A. Santoni, A. Simeoni, E. Leoni, and B. Porterie. Fire spread across pine needle fuel beds: characterization of temperature and velocity distributions within the fire plume. International Journal of Wildland fire, 13(1), 2004.
- [24] J. H. Balbi, J. L. Rossi, T. Marcelli, and P. A. Santoni. A 3D physical real-time model of surface fires across fuel bed. Combustion Science and Technology, 179, 2007.
- [25] J. H. Balbi, J. L. Rossi, T. Marcelli, and F. J. Chatelon. Physical modeling of surface fire under non-parallel wind and slope conditions. Combustion Science and Technology, 182(7-9), 2010.
- [26] J. L. Rossi, K. Chetehouna, A. Collin, B. Moretti, and J. H. Balbi. Simplified flame models and prediction of the thermal radiation emitted by a flame front in an outdoor fire. Combustion Science and Technology, 182, 2010.
- [27] J.L. Rossi, A. Simeoni, B. Moretti, and V. Leroy-Cancellieria. An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires. Fire Safety Journal, 2011.
- [28] Pastor E, Águeda A, Andrade-Cetto J, Muñoz M, Pérez Y, and Planas E. Computing the rate of spread of linear flame fronts by thermal image processing. Fire Safety Journal, 41(8), 2011.
- [29] J. R. Martinez-de Dios, J. C. André, Arrue B. Ch. Gonçalves, J. C., A. Ollero, and D. X. Viegas. Laboratory fire spread analysis using visual and infrared cameras. Inter. Journ.ofWildland Fire, 15, 2006.
- [30] J. R. Martinez-de Dios, B. C. Arrue, Merino L. Ollero, A., and F. Gomez-Rodriguez. Computer vision techniques for forest fire perception image and vision computing. Inter. Journ.ofWildland Fire, 26(4), 2008.
- [31] L. Rossi, T. Molinier, A. Pieri, M. Akhloufi, and Y Tison. Measurement of wildland _re geometric characteristics by stereovision techniques. Measurement Science and Technology, 22(12), 2011.
- [32] L. Rossi, T. Molinier, A. Pieri, M. Akhloufi, A e Pieri, and Y Tison. 3D vision system for the measurement of the rate of spread and the height of fire fronts. Measurement Science and Technology, 21(10), 2010.
- [33] L. Rossi, M. Akhloufi, and Y. Tison. On the use of stereovision to develop a novel instrumentation system to extract geometric _re fronts characteristics. FireSafety Journal, 46, 2011.
- [34] Fiche de données pour les systèmes "bumblebee stereo vision camera ». http://www.ptgrey.com/products/bbxb3/bumblebee2_xb3_datasheet.pdf
- [35] L. Rossi, T. Molinier, A. Pieri, M. Akhlou_, and Y Tison. Measurement of wildland fire geometric characteristics by stereovision techniques. Measurement Science and Technology, 22(12), 2011.

Feux éruptifs : prévoir le déclenchement d'une éruption

**F.J. CHATELON ⁽¹⁾, J.H. BALBI ⁽¹⁾, J.L. ROSSI ⁽¹⁾, T. MARCELLI ⁽¹⁾,
J.B. FILIPPI ⁽¹⁾, A. SIMEONI ⁽²⁾, C. ROSSA ^(3,4), D.X. VIEGAS ⁽⁴⁾**

(1) Università di Corsica, Sciences pour l'Environnement, UMR-CNRS 6134 SPE, Campus Grossetti, BP 52, 20250 Corti, France

(2) Worcester Polytechnic Institute, Department of Fire Protection, USA

(3) School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Leiria, Portugal

(4) Centre of Studies on Forest Fires/ADAI, University of Coimbra, Portugal

Email : chatelon@univ-corse.fr

Résumé

Chaque année les incendies de forêts parcourent des milliers d'hectares à travers le monde. De nombreux travaux ont été menés depuis une cinquantaine d'années afin de mieux comprendre le comportement du feu. Des modèles de propagation ont été créés, différents suivant le type de feu (feu de cimes, de surface, feu couvant...). La plupart de ces modèles se basent sur une vitesse de propagation stationnaire. Dans certains cas, le comportement du feu peut devenir extrême, avec une vitesse très rapide de la vitesse du front de flammes. Ce changement brusque, rapide et imprévisible de la progression du feu est extrêmement dangereux et souvent mortel pour les soldats du feu qui sont dépourvus d'outils d'anticipation de ce phénomène décrit comme une éruption. Notre interprétation du mécanisme provoquant l'éruption consiste en l'apparition d'un vent induit créé par le feu lui-même se propageant sur une pente et/ou soumis à un vent de vitesse donnée. On utilise un modèle de propagation stationnaire dont les deux équations principales sont couplées à l'expression de ce vent induit. Ainsi, lorsque les conditions météorologiques et les propriétés de la strate végétale sont connues, il est possible de déterminer un angle de pente critique au delà duquel l'éruption va se déclencher. Ce modèle est confronté avec succès à deux expériences de laboratoire et à un accident ayant entraîné la mort de 11 pompiers dans l'archipel des îles Kornati en Croatie.

Mots-clés : Feu éruptif – comportement extrême – déclenchement d'une éruption – prévision – modèle de propagation – vent induit.

1. Introduction

Les personnes impliquées dans la lutte contre les incendies ont remarqué que parfois, le comportement d'un feu se propageant à une vitesse faible (environ 0,1 m.s⁻¹) pouvait se transformer radicalement pour atteindre plusieurs mètres par seconde sans changement des conditions environnementales. Ce genre d'événement, du fait de son caractère imprévisible, est extrêmement dangereux et est la cause de nombreuses pertes humaines, particulièrement chez les pompiers.

Plusieurs termes ont été employés dans la littérature pour décrire ce phénomène. Nous retiendrons la définition donnée par Viegas [1] qui fait l'analogie avec une éruption volcanique. La notion de feu éruptif décrit donc une brusque accélération de la vitesse du front de flammes et une augmentation forte de l'énergie libérée dans un court laps de temps.

Des accidents liés à ce comportement extrême, avec de nombreuses pertes humaines ont été observés de par le monde, depuis Mann Gulch aux USA et ses 13 victimes en 1949 [2] jusqu'à l'accident des îles Kornati en Croatie et ses 11 victimes en 2007 [3, 4].

La littérature propose plusieurs tentatives d'interprétation de ce phénomène. Une première explication fut donnée par Byram et Nelson [5], liant déclenchement de l'éruption et turbulence du vent. Même si le rôle du vent dans la propagation d'un feu est évident et connu depuis longtemps, cette explication n'est pas totalement satisfaisante puisque l'analyse du "Loop fire" en Californie aux USA [6] montre que l'éruption a eue lieu en présence d'un vent contraire.

Une accumulation de gaz devant le front de flamme est également une raison invoquée pour expliquer l'apparition d'un feu éruptif puisque certains pompiers survivants à ce type d'accident ont décrit le feu comme une mare d'hydrocarbures enflammée. Cette observation a été infirmée par Butler et al [7] dans l'analyse du feu de South Canyon à Storm King Mountain dans le Colorado aux USA.

Récemment, une interprétation suggérée par Viegas [1] consiste en un effet de feedback causé par un flot d'air créé par le feu en présence de vent ou de pente.

Dans ce travail, nous retenons la proposition de Viegas et considérons que le vent induit est le mécanisme principal permettant de transformer un feu dont le comportement est classique en un feu éruptif. Nous donnons une modélisation physique de ce flot d'air induit par le feu. Nous donnons également, à l'aide d'un modèle de propagation, une condition physique permettant de déterminer le déclenchement de l'éruption. Il est à noter que c'est la première fois qu'une condition prévoyant explicitement une éruption est donnée dans la littérature. Cette condition sera testée sur deux expériences à l'échelle du laboratoire et sur l'accident des îles Kornati, ayant malheureusement coûté la vie à 11 soldats du feu.

2. Le vent induit

L'hypothèse du vent induit comme moteur d'un feu éruptif est très difficile à vérifier sur le terrain. De ce fait, cette éventualité n'a jamais été infirmée par l'étude d'un accident ayant causé des pertes humaines. Mais la description de quelques expériences de laboratoire et de feux réels a tendance à montrer que cette hypothèse semble correcte. Tout d'abord, considérons la propagation d'un feu sur une pente assez raide et soumis à un vent de faible intensité. La poursuite de la combustion nécessite le remplacement des gaz chauds sortant par le haut de la flamme. Un effet d'aspiration se crée et un air plus frais provenant des deux côtés du front de flammes est susceptible d'entrer dans la flamme. La géométrie de la flamme (voir figure 1) va causer une importante déviation du flot d'air provenant de l'avant du feu et donc, seule une partie de l'air provenant de la zone brûlée entrera dans la flamme pour apporter l'oxygène nécessaire à la combustion.

Ce vent induit aura donc la direction de la pente. Si un vent très fort est présent sur site, l'oxygène sera apporté par ce vent et il n'y a pas d'apparition de vent induit et ainsi d'éruption.

L'analyse de l'accident des îles Kornati [8] donne une première justification de la présence de ce vent induit. En effet, les conditions météorologiques donnaient un vent extérieur provenant du sud-est et d'intensité moyenne au niveau du sol (environ 40 km/h à 10 m de hauteur). Ce feu d'herbe s'est propagé de manière classique depuis son point d'ignition (Vruljebay) jusqu'à Sijnate Canyon situé 6,6 km plus loin. L'éruption a eu lieu dans ce canyon et 11 pompiers ont perdu la vie, 1 pompier étant grièvement blessé. Les déclarations du survivant confirment une importante vitesse de propagation du front de flammes (environ 5 ou 6 m.s⁻¹) mais surtout le vent très fort se trouvant dans le canyon et soufflant dans la direction du canyon c'est à dire provenant du sud. Ce changement de direction du vent mais aussi de son intensité peut traduire la présence d'un vent induit créé par le feu dont la largeur du front était très importante.

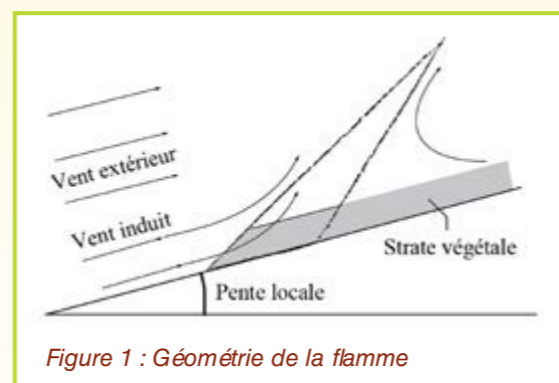


Figure 1 : Géométrie de la flamme

Bien entendu, cette interprétation est liée au témoignage du pompier survivant et peut donc être sujette à caution sans mesure enregistrée. L'analyse du feu ayant eu lieu en 2003 à Freixo da Espada-a-Cinta au Portugal [9, 1] permet de justifier la présence d'un vent induit à l'aide de données météorologiques. La configuration était la suivante : un vent de faible intensité (environ 15 km/h) soufflant du nord-ouest, un feu considéré comme maîtrisé par les pompiers au pied d'un canyon et deux personnes civiles décédées au final. Le feu s'est développé dans le canyon puis à un certain moment l'éruption s'est déclenchée pour atteindre très rapidement le sommet du canyon. Par pure coïncidence, une station météorologique se trouvant au sommet de la crête a été légèrement endommagée par le rayonnement des flammes mais les données ont pu être rapatriées. Les enregistrements de direction et de vitesse du vent sont assez explicites. En 30 minutes à peine, le vent a changé de direction pour passer du nord-ouest au sud sud-est (soit exactement la direction du canyon) et sa vitesse initiale de 15 km/h environ a atteint une valeur de 65 km/h avec des rafales mesurées à 96 km/h. L'éruption étant terminée, le vent a repris sa direction et intensité initiale. Aucun phénomène atmosphérique ne pouvant être invoqué pour expliquer ce changement brusque de direction et d'intensité, un vent créé par la flamme elle-même semble être la meilleure explication pour justifier ces données.

Il est possible de modéliser le vent induit d'un point de vue physique. Le modèle de Balbi [10, 11, 12] est modifié afin d'y intégrer l'expression du vent induit. Celui-ci peut être exprimé comme dépendant linéairement de la vitesse de propagation. Ainsi le modèle de propagation est constitué d'équations donnant les principales grandeurs physiques (vitesse de propagation, angle d'inclinaison de flamme, température de la flamme, hauteur de la flamme) dont les deux principales sont les suivantes :

$$R = p(\tan \gamma - \tan \alpha) \quad (1)$$

$$R = R_b + AR \frac{1 + \sin \gamma - \cos \gamma}{1 + \frac{R \cos \gamma}{r_0}} \quad (2)$$

où R est la vitesse de propagation en m.s⁻¹, R_b est la contribution du rayonnement de la base de la flamme, γ est l'angle d'inclinaison de la flamme, α est l'angle de pente, r_0 un coefficient du modèle et A un paramètre du modèle traduisant le rayonnement de la flamme. Le coefficient p contient implicitement la modélisation du vent induit. Le déclenchement de l'éruption.

Les équations (1-2) sont couplées, admettant dans certains cas, une solution finie. Si une solution finie (propagation classique du feu) n'existe pas, il existe une solution infinie, correspondant à un phénomène non stationnaire traduisant l'éruption du feu.

Si l'étude de la vitesse R en fonction de la tangente de l'angle de pente ($\tan \gamma$) dans l'équation (1) correspond à une droite de pente p , la vitesse R donnée par l'équation (2) correspond (lorsque $A > 1/2$) à une courbe ressemblant à une exponentielle mais avec une asymptote oblique à l'infini. On appelle p_∞ la pente de cette droite asymptote. Après une analyse mathématique de ce système couplé, on arrive à déterminer une condition qui donne la possibilité d'avoir une éruption. Cette condition est déterminée par la valeur du rapport p/p_∞ . Tant que ce rapport est supérieur à 1, une éruption est impossible. En remplaçant p et p_∞ par leurs valeurs respectives, on obtient la condition suivante, qui si elle est vérifiée, donne le signal du danger d'éruption :

$$\left(\frac{p}{p_\infty} = \frac{\rho_v}{\tau_0 B T_a T^3 \left[\frac{Y}{4(C_p \Delta T + m \Delta h)} - \frac{1}{2 \nu \chi_0 \Delta H} \right]} \right) < 1 \quad (3)$$

où τ_0 , B , χ_0 sont des constantes fixées, T_a est la température ambiante (K), T est la température de la flamme (K), C_p est la capacité calorifique du végétal (J.kg⁻¹.K⁻¹), ΔT est la différence entre la température d'ignition et la température ambiante (K), m est l'humidité du végétal, Δh est l'enthalpie de vaporisation (J.kg⁻¹), ΔH est l'enthalpie de combustion des gaz de pyrolyse (J.kg⁻¹), ν est le coefficient d'absorption du végétal (dépendant de la surface foliaire), ρ_v est la masse volumique du végétal (kg.m⁻³) et Y un coefficient traduisant l'effet de la largeur du front de flammes et de la longueur de la flamme.

Plusieurs conditions sont nécessaires pour que (3) soit vérifiée :

Caractéristiques de la strate végétale

- Un végétal léger avec une masse volumique et une capacité calorifique faible ;
- Un végétal à faible composante ligneuse. En effet, plus le pourcentage de charbon sera faible, plus l'enthalpie de combustion des gaz de pyrolyse sera élevée. Cette enthalpie intervient directement dans la formule (3) mais également avec une puissance égale à 3 à travers l'expression de la température moyenne de la flamme ;
- Une charge suffisante. La charge intervient dans la définition de la surface foliaire présente dans le coefficient d'absorption ν , la valeur $\nu = 1$ représentant la condition idéale. Par exemple, pour un feu d'herbe dont la masse volumique est égale à 400 kg.m⁻³ et le rapport surface-volume est égal à 10000 m⁻¹, il suffit d'avoir une charge végétale égale à 0,16 kg.m⁻² ;
- Un végétal sec. Plus l'humidité m sera faible, plus la formule (3) sera facilement vérifiée ;

Facteurs environnementaux

Une forte température ambiante. En effet, T_a joue un rôle direct dans (3) mais également à travers la température moyenne de la flamme et la température d'ignition T_i puisque lorsque les températures estivales sont élevées (de l'ordre de 40°C), des COV peuvent être émis en quantité suffisante pour s'enflammer à une température plus faible que la température d'ignition habituelle [13].

Une humidité ambiante relativement faible, puisqu'il a été montré que l'humidité du végétal m était une fonction croissante de l'humidité de l'air [14].

Facteurs liés à la dynamique du feu

Un coefficient Y important, c'est à dire un rapport largeur du front sur longueur de flamme important. Plus le front de flammes est large, plus la condition (3) a des chances d'être réalisée. Cette condition est plus facilement réalisée dans les canyons où la configuration géométrique de la topographie fait que l'effet de pointe a plus de difficultés à se former que sur une simple pente.

4. Étude numérique

On peut remarquer que la condition (3) n'inclut aucune relation sur la pente. Or, à notre connaissance, aucun feu éruptif n'a été constaté sur terrain plat que ce soit à l'échelle du terrain ou à l'échelle du laboratoire. Rappelons que la condition (3) ne donne pas directement le déclenchement de l'éruption mais simplement les conditions pour lesquelles le danger d'éruption est fort. Le déclenchement sera donné par une condition sur la pente, c'est à dire que l'objectif est de trouver la pente critique pour laquelle l'éruption aura lieu à partir du moment où (3) est vérifiée.

Il est très difficile de déterminer cette pente critique α_c de manière analytique. Mais il est possible d'obtenir une valeur numérique de α_c . On recherche donc la valeur de l'angle de pente pour lequel l'éruption se déclenche lorsque plusieurs paramètres varient les uns après les autres. Ces paramètres sont l'humidité m , l'enthalpie de combustion des gaz de pyrolyse ΔH , la capacité calorifique C_p et la température ambiante T_a . L'angle de pente α

varie de 0° à 50° par pas de 1°. Le combustible considéré est de la paille (rapport surface-volume égal à 10000m⁻¹ et charge égale à 0,6 kg.m⁻²).

Comme présenté sur la figure 2, les résultats donnent une expression de la tangente de l'angle critique α_c en fonction du rapport p/p_∞ défini dans (3).

On a :

$$\tan \alpha_c = \frac{p}{p_\infty} - 0.25 \quad (4)$$

Notons que cette relation (4) n'est valable que lorsque la strate végétale considérée est de la paille avec les paramètres choisis pour ces simulations. Si les paramètres ou le végétal sont modifiés, la relation (4) n'est plus valable mais la relation entre $\tan \alpha_c$ et p/p_∞ reste une droite affine. En fait, seuls les coefficients de la droite sont changés.

Les conditions (3) et (4) ont été testées sur 2 types d'expériences différentes à l'échelle du laboratoire. Le premier ensemble d'expériences a été conduit par Viegas [15] au laboratoire de l'ADAI au Portugal. Une strate d'aiguilles de pins (*Pinus pinaster*) était disposée sur une table de brûlage de dimensions 3 m x 3 m pouvant être inclinée jusqu'à un angle de 40°. Viegas n'a constaté aucune éruption, même pour des pentes fortes (30° et 40°), à cause de l'effet de pointe au centre du front de flammes (ce qui correspond à un faible coefficient Y , estimé d'après les données de l'expérience, inférieur à 0,75). Les simulations effectuées montrent exactement le même résultat, à savoir pas d'éruption, car le rapport p/p_∞ est toujours plus grand que 1, sauf lorsque le coefficient Y est supérieur à 0,95.

Le second ensemble d'expériences a été mené par le laboratoire de l'ADAI pour Dold [16]. Il s'agit d'une série de 5 expériences sur de la paille avec des pentes égales à 15°, 20°, 25°, 30° et 35° obtenues grâce à l'inclinaison de la table de brûlage. La particularité de ces expériences tient aux murs latéraux rajoutés sur les bords de la table. Ces murs ont un double rôle, celui d'empêcher les entrées d'air frais sur les côtés du front de flammes et donc supprimer l'effet de pointe. Le second objectif de ces murs est de simuler un front beaucoup plus large que le front réel puisqu'ils peuvent réfléchir le rayonnement et donc créer un front virtuel plus large. Les auteurs ont ainsi pu simuler un feu éruptif pour les deux plus fortes pentes, c'est à dire 30° et 35°. L'angle critique permettant le déclenchement de l'éruption est donc compris entre 25° et 30°. La difficulté de simuler ces expériences tient au fait que la largeur du front n'est pas connue mais on peut supposer que le coefficient Y doit être bien supérieur à 0,75 (valeur obtenue pour les expériences précédentes). Une valeur comprise entre 0,8 et 0,9 semble être cohérente et pour la valeur moyenne de 0,85, les simulations donnent le déclenchement de l'éruption pour un angle critique de 26°, ce qui correspond aux résultats expérimentaux.

La dernière validation a été effectuée sur l'accident des îles Kornati en Croatie (2007). L'éruption s'est déclenchée dans un petit canyon (500 m de long) de pente assez faible (environ 9°). Un large feu d'herbe (assez haute, 30cm environ) est arrivé à l'entrée du canyon puis est entré en éruption, prenant au piège 12 pompiers dont un seul en réchappera. En utilisant les conditions environnementales et les caractéristiques de la strate végétale données par [8] et de [4] les simulations effectuées donnent un angle critique de 8° pour le déclenchement de l'éruption.

5. Conclusion

Ce travail a permis d'exposer explicitement une condition indiquant le danger d'éruption, basée uniquement sur des considérations physiques. Un modèle physique simplifié de propagation est utilisé pour introduire le vent induit par le feu, principal mécanisme de l'éruption. A partir de ce modèle, des simulations numériques permettent de déterminer l'angle de pente critique pour lequel l'éruption se déclenche dès que la condition (3) sera satisfaite.

En résumé, les conditions idéales pour satisfaire la condition (3) (qui correspond au danger d'éruption) sont :

Un végétal léger, faiblement ligneux, avec une charge suffisante,

Des conditions estivales sèches (température ambiante élevée, humidité de l'air faible),

Un large front de feu.

6. Bibliographie

- [1] Viegas, D.X. (2005) A mathematical model for forest fires blowup, *Combustion Science and Technology*, 177,1, 27-51.
- [2] Rothermel R.C. (1993) Mann Gulch fire : a race that couldn't be won, General Technic Report INT-299, USDA Forest Service, 10p.
- [3] Viegas, D.X., Stipanicev, D., Ribeiro, L., Pita, L.P., Rossa, C. (2008) The Kornati fire accident – eruptive fire in relatively low fuel load herbaceous fuel conditions, in : Witpress (Ed.) *Modelling, Monitoring and Management of forest fires*, Vol. I, pp 365-375.
- [4] Stipanicev, D., Spanjol, Z., Vucetic, M., Vucetic, V., Rosavec, R., Bodrozic, Lj. (2008) The Kornati fire accident facts and figures – configuration, vegetation and meteorology, in: Witpress (Ed.) *Modelling, Monitoring and Management of forest fires*, Vol. I, pp 387-396.
- [5] Byram GM, Nelson RM (1951) The possible relation of air turbulence to erratic fire behavior in the South East. *Fire Control Notes* 12(3), 1-8
- [6] Countryman CM, Fosberg MA, Rothermel RC, Schroeder MJ (1968) Fire weather and fire behaviour in the 1966 loop fire. *Fire Technol* 4(2), 126-141
- [7] Butler B.W., Bartlette R.A., Bradshaw L.S., Cohen J.D., Andrews P.L., Putnam T., Mangan R.J. (1998). Fire behavior associated with the 1994 South Canyon Fire on Storm King Mountain, Colorado, Research Paper RMRS-RP-9, Ogden, UT, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 82 p.
- [8] Viegas D.X., Simeoni A., Xanthopoulos G., Rossa C., Ribeiro L.M., Pita L.P., Stipanicev D., Zinoviev A., Weber R., Dold J., Caballero D., San Miguel J. (2009) Recent Forest Fire Related Accidents in Europe, JRC Scientific and Technical Reports, 75 pp., doi, 10.2788/50781.
- [9] Viegas, D.X. (2004a) *Cercadospelo Fogo* (in Portuguese), Minerva Editora (Eds), 274 pp.
- [10] Balbi, J.H., Rossi, J.L., Marcelli, T., Santoni, P.A. (2007) A 3D physical real-time model of surface fires across fuel beds, *Combustion Science and Technology*, 179, 12, 2511-2537.
- [11] Balbi, J.H., Morandini, F., Silvani, X., Filippi, J.B., Rinieri, F. (2009) A physical model for wildland fires, *Combustion and Flame*, 156, 2217-2230.
- [12] Balbi, J.H., Rossi, J.L., Marcelli, T., Chatelon, F.J. (2010) Physical modeling of surface fire under nonparallel wind and slope conditions, *Combustion Science and Technology*, 182, 922-939.
- [13] Chetehouna, K., Barboni, T., Zarguili, I., Leoni, E., Simeoni, A., Fernandez-Pello, A.C. (2009) Investigation on the emission of Volatile Organic Compounds from heated vegetation and their potential to cause an eruptive forest fire, *Combustion Science and Technology*, 181, 10, 1273-1288.
- [14] Ascoli, D., Bovio, G. (2010) Appraising fuel and fire behaviour for prescribed burning application in heathlands of Northwest Italy, in: D.X. Viegas (Ed.) VI International Conference on Forest Fire Research proceedings, Coimbra.
- [15] Viegas, D.X. (2004b) On the existence of a steady state regime for slope and wind driven fires, *International Journal of Wildland Fire*, 13, 101-117.
- [16] Dold, J.W., Zinoviev, A. (2009) Fire eruption through intensity and spread rate interaction mediated by flow attachment, *Combustion Theory and Modelling*, 13, 763-793.

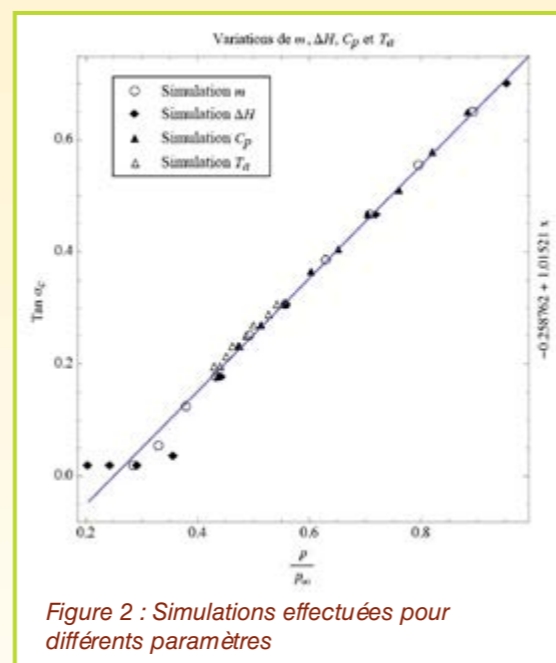


Figure 2 : Simulations effectuées pour différents paramètres

Modèle analytique pour l'évaluation des distances de sécurité

J.L. ROSSI ⁽¹⁾, A. SIMEONI ⁽²⁾, B. MORETTI ⁽¹⁾
ET V. LEROY-CANCELLIERI ⁽¹⁾

(1) UMR CNRS SPE 6134, Université de Corse - France

(2) Department of Fire Protection Engineering, Worcester Polytechnic Institute - USA
Email : rossi@univ-corse.fr

Résumé

Le principal danger pour des personnes situées à proximité d'un front de feu mais hors d'atteinte des flammes provient principalement de l'énergie rayonnée émanant de l'incendie. La nécessité de connaître le flux de chaleur rayonnée impactant une cible a donc conduit, par le passé, à l'élaboration de nombreux modèles de flamme. Le modèle de flamme proposé ici est basé sur l'hypothèse de la flamme solide. Il est à noter, que cette approche est celle qui est couramment utilisée par l'industrie pétrolière pour évaluer l'impact d'un feu de nappe sur une cible. Le rayonnement du feu est alors calculé à partir d'une approximation sur la géométrie de la flamme et des propriétés équivalentes de cette dernière. Afin de déterminer les Distances de Sécurité Acceptables (DSA), deux méthodes sont proposées : (i) une approche numérique et (ii) une formulation analytique approchée. Les résultats sont comparés, dans des configurations spécifiques, à deux modèles existants. Une étude de sensibilité est également menée dans le but d'identifier les paramètres devant être choisis avec minutie afin d'accroître la précision des calculs. Les résultats montrent que cette modélisation est une bonne approximation des DSA.

Mots clefs : Feux de forêt, Distance de Sécurité Acceptable (DSA), flamme solide, modèle analytique

1. Introduction

Chaque année les incendies dus à des feux de forêt sont responsables de pertes de vies humaines et de dommages environnementaux importants. Le transfert de chaleur par rayonnement est jusqu'à présent considéré comme le principal mécanisme de transfert de chaleur pour ces feux de forêt [1]. Les deux autres étant la convection et la conduction. Cependant, le rayonnement thermique est communément admis comme le mode de transfert de chaleur dominant pour les incendies de grande envergure. Ainsi, la nécessité de déterminer le flux de chaleur rayonné a conduit à l'élaboration de nombreux modèles de flamme [2, 3]. En outre, des informations précises sur le flux de chaleur rayonné sont nécessaires dans un certain nombre d'applications. Il s'agit notamment de : l'établissement des distances de sécurité pour les pompiers [4, 5] et l'élaboration de modèles de propagation du feu [6-8]. Ce travail propose une nouvelle méthode pour calculer une Distance de Sécurité Acceptable (DSA). En effet, afin de déterminer ces Distances de Sécurité Acceptables (DSA), deux méthodes sont proposées :

(i) une approche numérique et (ii) une formulation analytique approchée. Les résultats sont comparés, dans des configurations spécifiques, à deux modèles existants. Une étude de sensibilité est également menée dans le but d'identifier les paramètres devant être choisis avec minutie. Les résultats montrent que cette modélisation est une bonne approximation des DSA mais qu'elle devra faire l'objet d'études complémentaires avant d'être intégrée dans un outil d'aide à la décision utilisable par des opérationnels.

2. Quantification de l'énergie rayonnée par un front de flammes

En raison de la complexité des mécanismes présents lors d'un feu de forêt, la modélisation de la structure de la flamme peut être réalisée avec différents degrés de simplification allant d'une approche empirique des phénomènes à une approche plus fine faisant appel à des modèles physiques complexes avec une mise en œuvre numérique plus lourde. Une méthode populaire d'estimation de la quantité d'énergie rayonnée à partir d'un front de feu est l'approche utilisée par l'hypothèse de la flamme solide. Dans la plupart des modèles de flamme solide le feu est envisagé comme une forme géométrique simple qui émet de l'énergie radiative uniformément sur toute sa surface comme un corps gris [9]. Par exemple, dans le cas de la propagation d'un grand feu, un parallélogramme peut être utilisé pour idéaliser le front de flammes réel [10] (cf. fig. 1).

Si l'approche de la flamme solide est adoptée, la flamme est alors envisagée comme une surface radiante avec une hauteur, une température équivalente constante et une émissivité équivalente connue. Il est à noter que cette hypothèse a déjà été utilisée par plusieurs auteurs pour établir des modèles simplifiés de flamme radiatifs pouvant être utilisés dans des modèles de comportement du feu [4, 8, 11, 12]. Dans le cas des feux de forêt, le combustible est une végétation hétérogène. L'approche présentée ici considère un combustible équivalent aux propriétés moyennes. En outre, les zones non-visibles de la flamme ne sont pas prises en compte. En effet, le rayonnement provenant des zones invisibles est supposée négligeable par rapport au flux de chaleur totale [13]. Ainsi, le flux thermique rayonné à partir d'un feu et reçu par une cible à proximité est donné par l'expression :

$$\Phi^{th}(M) = \tau F_{f \rightarrow M} E_f \quad (1)$$

où τ est la transmissivité atmosphérique, est le facteur de vue géométrique de la flamme visible et E_f est le pouvoir émissif de la surface du front de feu. La transmissivité atmosphérique est une fonction de l'humidité et la distance entre la région de combustion et la cible. Dans de nombreux cas, ce paramètre est supposé égal à 1. Le facteur de vue $F_{f \rightarrow M}$ est une simple fonction géométrique dépendant de la position relative du récepteur et la flamme. Cette approche est relativement simple, mais elle exige l'estimation des caractéristiques géométriques du front de flammes équivalent sélectionné, ainsi que l'évaluation du pouvoir émissif du front de flammes. Il convient de noter que la valeur du pouvoir émissif de la flamme dépend des hypothèses faites dans le calcul de la transmissivité atmosphérique. Il est donc possible de calculer l'énergie rayonnée par la flamme si les propriétés de la flamme et la géométrie de du front de feu sont connus.

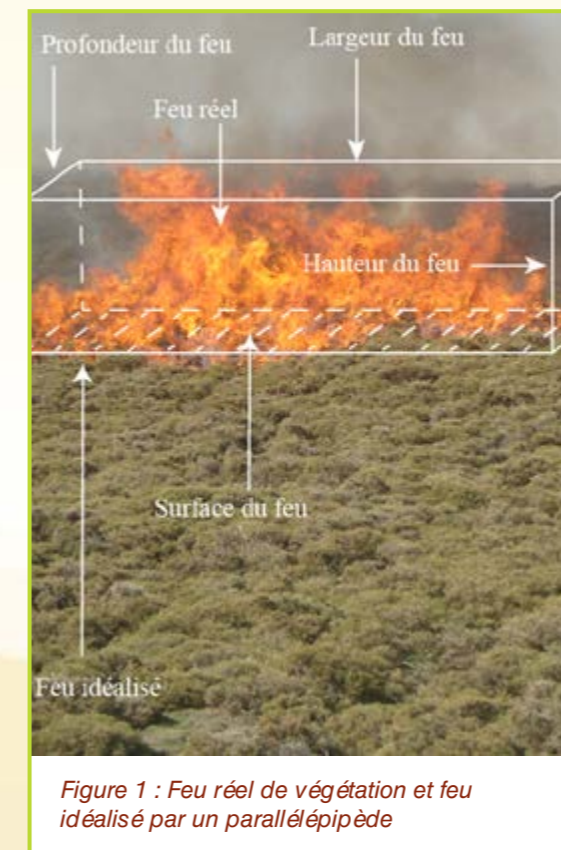


Figure 1 : Feu réel de végétation et feu idéalisé par un parallélogramme

L'approche adoptée pour calculer le pouvoir émissif de la flamme est l'hypothèse qui consiste à traiter le front de flammes comme une source à température radiative constante sur toute sa surface. Ainsi, la loi de Stephan-Boltzmann [14] peut être utilisée :

$$E_f = \varepsilon_f B T_f^4 \quad (2)$$

où ε_f est l'émissivité équivalente de la flamme, B est la constante de Stephan-Boltzmann, T_f est la température équivalente de la flamme. L'émissivité ε_f d'un front de feu est définie comme le rapport du rayonnement total émis par la source de surface équivalente choisie sur le rayonnement qui serait émis par un corps noir à la même température. Cette émissivité est une fonction de la longueur d'onde et la température de la surface, mais aussi de la direction d'émission. L'hypothèse retenue dans cette étude est que l'émissivité spécifiée dans la loi de Stephan-Boltzmann est la moyenne de cette variation.

3. Expression analytique de la DSA

D'un point de vue de la sécurité, l'une des principales préoccupations est le risque d'exposition des personnes aux effets de la chaleur rayonnée lors d'un incendie provenant de grands feux de végétation. Ces études sont basées sur un critère d'exposition, à savoir, le niveau de flux de chaleur limite à ne pas dépasser. La distance à laquelle ce niveau de flux de chaleur se produit est considérée comme la distance à laquelle les êtres humains pourraient souffrir de graves lésions cutanées. Donc comme le montre la figure 2, il est possible de déterminer une Distance de Sécurité Acceptable (DSA).

Cette distance entre la cible et le feu est celle pour laquelle le flux thermique radiatif est inférieur à un niveau de flux de chaleur limite [15]. Cette section propose deux méthodes pour estimer une DSA : une détermination numérique qui fournit la valeur exacte de la DSA et une expression analytique, qui fournit une valeur approximative de la DSA sous une forme plus simple et plus rapide à utiliser dans l'optique d'une application par des opérationnels. Si un grand feu est envisagé (largeur du front infini), alors l'expression du facteur de forme se simplifie [8] :

$$F_{f \rightarrow M}^{WI}(r, \theta_f) = \frac{1}{2} \sin \theta_f \quad (3)$$

ou

$$\theta_f = \arctan \left(\frac{l_f \cos \gamma}{r - l_f \sin \gamma} \right) \quad (4)$$



Figure 2 : Distance de Sécurité Acceptable lors d'un feu de végétation.

Afin d'obtenir une expression analytique de la distance de sécurité en fonction des caractéristiques de la flamme (angle d'inclinaison, longueur, émissivité, transmissivité, température équivalente) et en fonction d'une valeur limite de la quantité de chaleur rayonnée pour des personnes ou des structures, il est nécessaire d'obtenir la solution explicite de l'équation ci-dessous :

$$\frac{\tau \varepsilon B T_f^4}{2} \sin \left(\arctan \left(\frac{l_f \cos \gamma}{DSA^{WI} - l_f \sin \gamma} \right) \right) = \Phi_{seuil} \quad (5)$$

En utilisant des propriétés trigonométriques et après quelques calculs la relation suivante est obtenue :

$$DSA_1^{WI} = \frac{l_f \Phi_{seuil} \cos \gamma \sqrt{-4 l_f \Phi_{seuil} + (B T_f^4 \varepsilon \tau)^2}}{2 \Phi_{seuil}} + l_f \sin \gamma \quad (6)$$

Finalement, pour un front de flammes suffisamment large pour être considéré comme infini, la distance de sécurité pour un seuil de chaleur acceptable peut être calculée à l'aide d'une expression analytique (6). Malheureusement, dans le cas d'un front de flammes réel avec une largeur finie, en raison de la complexité du problème il n'est pas possible de trouver une solution analytique de ce type. En utilisant les résultats de la résolution numérique, l'approximation suivante est envisagée pour traduire l'évolution de la distance de sécurité en fonction du rapport (largeur du front de flammes/longueur de flammes) :

$$DSA = DSA_1^{WI} \left(1 - \exp \left(-k_{thres} \frac{2L}{l_f} \right) \right) \quad (7)$$

où K_{thres} est un paramètre empirique qui doit être déterminé pour chaque seuil sélectionné du flux de chaleur et $2L$ la largeur du front de flammes.

4. Etude de sensibilité du modèle d'évaluation des DSA

Les paramètres testés pour l'analyse de sensibilité du modèle d'évaluation des DSA sont : l'angle d'inclinaison du front de flammes (γ), la longueur de la flamme (l_f), la largeur du feu ($2L$), l'émissivité équivalente de la flamme (ε_f) et la température équivalente de la flamme (T_f). Les valeurs choisies correspondent à des feux expérimentaux avec des arbustes de 0,7 m de haute [16]. Chaque paramètre d'entrée est augmenté $\pm 10\%$ par rapport à sa valeur par défaut, tandis que tous les autres paramètres sont maintenus à leur valeur par défaut. La figure 3 présente les résultats pour des paramètres dont la valeur par défaut a été augmentée de + 10%, mais les conclusions sont les mêmes pour une variation de -10%.

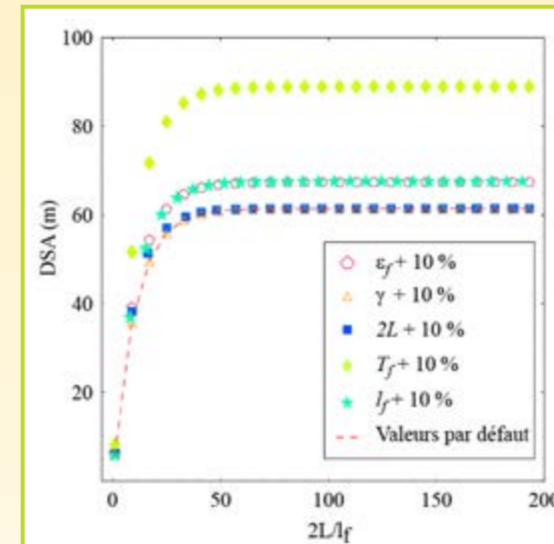


Figure 3 : Etude de sensibilité appliquée au modèle de détermination des DSA

Le tableau 1 indique que les paramètres ayant des effets non négligeables sur l'évaluation des DSA sont, par ordre d'importance, les paramètres suivants : la température équivalente de la flamme (T_f), l'émissivité équivalente de la flamme (ε_f) et la longueur de la flamme (l_f). Toutefois, l'émissivité de la flamme et la longueur de cette dernière ont une influence bien moindre sur les DSA que la température équivalente de cette flamme. Il est à noter qu'une incertitude sur la valeur de l'angle d'inclinaison de la flamme (γ) et sur la largeur du front de feu ($2L$) ne produisent que des variations minimales sur les résultats du modèle. Ceci démontre que si la température de la flamme ou si l'émissivité de cette dernière sont évaluées de manière peu précise, des erreurs graves dans l'estimation des DSA pourraient se produire. Cela pourrait avoir pour conséquence d'engendrer des décisions erronées et donc dangereuses pour les opérationnels.

Paramètre	Valeur par défaut	Valeur (+10%)	Valeur (-10%)	Moyenne (ASD-ASD _{-10%}) (m)	Moyenne (ASD-ASD _{-10%}) (m)
T_f (K)	1200	1320	1080	- 25.66	19.23
ε_f	0.5	0.55	0.45	- 5.54	5.56
l_f (m)	10	11	9	- 5.38	5.45
L (m)	5 - 1000	5.5 - 1100	4.5 - 900	- 0.29	0.35
γ (°)	20	22	18	0.42	- 0.35

Tableau 1 : Synthèse de l'analyse de sensibilité appliquée au modèle de détermination des DSA. Flux limite imposé : 4.7 kW.m²

5. Comparaison du modèle à deux modèles existants.

Les systèmes de prédiction du comportement des incendies, comme par exemple BehavePlus [16], sont composés de plusieurs sous-modèles de comportement du feu mais ils disposent également de modèles prévoyant les effets de ce dernier. Des modèles de propagation d'incendie (de surface et/ou de cime) sont ainsi liés à plusieurs autres modèles tels que ceux utilisés pour estimer la taille minimale des zones de sécurité pour les personnes en charge de la lutte. Par exemple, Butler et Cohen [17] ont déterminé, à partir des résultats expérimentaux et seulement pour une valeur du seuil, une loi empirique : « la taille de la zone de sécurité doit être au moins 4 fois la hauteur de flamme maximale ». Pour cela, ils assument un front de feu verticale, à une température de 1200 K avec une émissivité de 1 et une largeur du front de 20 m. Ils ont sélectionné un seuil de 7 kW.m². Ce seuil est considéré comme le niveau maximal acceptable par les pompiers portant un équipement de protection. Zarate et al. [4] ont également utilisé le modèle de flamme solide mais afin de simplifier les calculs, ils n'ont envisagé que l'hypothèse « du cas critique ». Dans l'hypothèse « du cas critique » le récepteur est toujours situé à une hauteur équivalente à 50% de la hauteur de la flamme. Par exemple, que si avez une flamme de 20 m est considérée, une cible donc un homme de 10 m.) De plus, ils n'ont utilisé qu'une méthode numérique pour calculer la DSA. Le tableau 2 ci-dessous montre les résultats obtenus, pour deux scénarios, en utilisant le modèle proposé et deux modèles existants.

Modèle utilisé	DSA(m) Scénario (a)	DSA (m) Scénario (b)
Analytique	21.58	31.13
Butler and Cohen	20	40
Zarate et al.	21.60	31.41

Tableau 2 : Comparaison entre le modèle proposé et la configuration extrême des cas proposés par Zarate et al. [9] pour différentes valeurs d'angle d'inclinaison de flamme (largeur infinie, $\gamma = 0^\circ$ to 40° , $h = 2$ m, $l_f = 10$ m, $T_f = 1200$ K, $\tau = 1$ and $\varepsilon = 1$). Flux limite imposé 7 kW.m²

Pour ces deux cas particuliers (scénario (a) et (b)), les résultats montrent que tous les modèles fournissent des valeurs de la DSA similaires. Les différences entre les modèles numériques et le modèle empirique de Butler et Cohen sont certainement dues au fait que ce modèle empirique a été obtenu dans des conditions réelles avec des incertitudes dans la détermination de la géométrie du front de feu. De plus, cette formulation empirique a été obtenue pour des flammes uniquement issues de brûleurs.

6. Conclusion

L'objectif de cette étude était de fournir une expression analytique afin de calculer les distances de sécurité acceptables (DSA). La nécessité de calculer le flux de chaleur provenant d'un incendie de grande taille a conduit à faire un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Le modèle analytique proposé peut être utilisé pour différentes valeurs du seuil ce qui n'est pas toujours le cas pour les modèles existants. Il est à noter que c'est le seul modèle analytique actuellement fondé sur une base physique. De plus, ce travail montre que les paramètres ayant des effets importants sur le résultat de l'évaluation de ces distances de sécurité sont : la température, l'émissivité et la longueur. Donc, si les utilisateurs sélectionnent une température ou une émissivité de flamme incorrectes, cela peut engendrer une évaluation erronée des DSA, ce qui peut conduire à des décisions erronées et donc dangereuses pour les personnes en charge de la lutte. Ces premiers résultats indiquent que cette approche est une bonne approximation des DSA mais qu'elle devra faire l'objet d'études complémentaires sur le terrain avant d'être intégrée dans un outil d'aide à la décision utilisable par des opérationnels.

7. Références

- [1] Viegas, D.X. (2004) On the existence of a steady state regime for slope and wind driven fires. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 101-117.
- [2] Viskanta R. (2008) Overview of some radiative transfer issues in simulation of unwanted fires. *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 1563-1570.
- [3] Sacadura J.F. (2005) Radiative heat transfer in fire safety science. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 93 (1-3), 5-24.
- [4] Zàrate L, Arnaldos J. and Casal J. (2008) Establishing safety distances for wildland fires. *Fire Safety Journal*, 43, 565-575.
- [5] Raj P.K. (2008) A review of the criteria for people exposure to radiant heat flux from fires. *Journal of Hazardous Materials*, 159, 61-71.
- [6] Morvan D., Méradji S. and Accary G. (2008) Physical modelling of fire spread in Grasslands. *Fire Safety Journal*, 44 (1), 50-61.
- [7] Séro-Guillaume O., Ramezani S., Margerit J., Calogine D. (2008) On large scale forest fires propagation models. *International Journal of Thermal Sciences*, 47 (6), 680-694.
- [8] Balbi J.H., Rossi J.L., Marcelli T. and Santoni P.A. (2007) A3D physical real-time model of surface fires across fuel beds. *Combustion Science and Technology*, 179 (12), 2511-2537.
- [9] Knight I.K. and Sullivan A.L. (2004) A semi-transparent model of bushfires flames to predict radiant heat flux. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 201-207.
- [10] Viskanta R. (2008) Overview of some radiative transfer issues in simulation of unwanted fires. *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 1563-1570.
- [11] Dupuy, J.L. (2000) Testing Two Radiative Physical Models for Fire Spread Through Porous Forest Fuel Beds. *Combustion Science and Technology*, 155(1), 149-180.
- [12] Morandini F., Santoni P.A. and Balbi J.H. (2001) The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope. *Fire Safety Journal*, 36, 519-543.
- [13] Baukal C.E., Gebhart B. (1997) Oxygen-enhanced/natural gas flame radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40 (11), 2539-2547.
- [14] Sullivan A.L., Ellis P.F. and Knight I.K. (2003) A review of radiant heat flux models used in bushfire applications. *International Journal of Wildland Fire*, 12, 101-110.
- [15] McGrattan K.B., Baum H.R., Hamins A. (2000) Thermal Radiation from Large Pool Fires. Paper NISTIR 6546, U.S. Department of Commerce: Fire Safety Engineering Division, Building and Fire Research Laboratory.
- [16] Andrew P. L., Bevins C. D., Seli. R. C. (2008) BehavePlus fire modeling system, version 3.0: User's Guide. RMRS-GTR-106WWW, USDA Forest Service.
- [17] Butler B.W. and Cohen J.D. (1997) Firefighter Safety Zones: A Theoretical Model Based on Radiative Heating. *International Journal of Wildland Fire*, 8(2) 73-77.

Simulation de grands incendies avec ForeFire

J.B. FILIPPI

UMR CNRS 6134
Sciences pour l'Environnement
University of Corsica
Corte, France
Email : filippi@univ-corse.fr

Résumé

Le développement et le test du simulateur incendie ForeFire est une des concrétisations des recherches menées par l'équipe « Feux de Forêt » à l'Université de Corse depuis maintenant plus d'une dizaine d'année. La disponibilité de ce logiciel, des codes de simulation, de son interface graphique et des routines d'entrée sortie pour les types de données géographiques courants représente plus de 100 000 lignes de code. L'originalité de ce travail est l'adaptation des méthodes efficaces lagrangiennes de transport d'interfaces sans maillage (autre que celui du front). La plupart du travail effectué dans le domaine de la simulation de grands incendies a été réalisé avec des modèles pronostiquant directement la vitesse de propagation ou Rate of Spread (RoS). Le simulateur développé permet d'utiliser cette information sur la vitesse de propagation pour reconstruire rapidement l'enveloppe du front et son évolution au cours du temps.

Mots Clés : Incendies, simulation, feu, événements discrets.

1. Introduction

Plusieurs approches pour la modélisation de la propagation de feux de forêts existent ; on peut noter en particulier les modèles multiphasiques, les modèles physiques comportementaux et les modèles empiriques. Une revue récente de ces familles de modèles a été réalisée par Sullivan [1]. Pour la plupart de ces modèles, le vent n'est qu'une donnée de forçage : il n'y a pas de rétroaction du feu sur les variables atmosphériques.

Les modèles multi-phases, proposés initialement par Grishin [2] et dont l'approche a été précisée et adaptée dans de nombreux modèles s'intéressent à la dynamique de la flamme, depuis la phase solide (combustible), jusqu'à la combustion des gaz de pyrolyse et l'écoulement résultant. Ces approches, si elles permettent l'étude fondamentale du comportement du feu à l'échelle de la flamme et de son environnement immédiat, ont un champ d'application réduit car il faut à la fois connaître très finement le combustible (structure et composition) mais aussi, du fait de la résolution spatiale requise, disposer de moyens de calcul très importants pour simuler des propagations sur une surface très restreinte [3][4].

Les modèles physiques comportementaux simplifient les phénomènes de combustion de petite échelle et proposent un dégagement de chaleur dépendant de la profondeur de flamme et d'une vitesse de propagation basée sur le rayonnement. Parmi ces modèles on peut citer le travail de l'IUSTI de Marseille utilisant une méthode de Monte Carlo pour le transfert radiatif vers la végétation [5] et enfin le modèle de vitesse de front de flamme basé sur l'hypothèse de panneau radiant utilisé dans ForeFire [6] [7]. L'originalité de ce code tient en sa capacité à simuler de très grands incendies en peu de temps, tout en maintenant le niveau de détail nécessaire. Quelques résultats sont présentés après un bref aperçu de cette méthode.

2. Méthode de suivi d'interface et méthode des marqueurs asynchrones [8]

Les méthodes de suivi d'interface s'intéressent à l'évolution de la frontière entre deux phases d'un système (brûlé/non brûlé, huile/eau, etc.). La Figure 1 présente un front constitué de plusieurs de ces marqueurs. La direction de chacun des marqueurs est une approximation de la normale donnée par la bissectrice de l'angle formé entre ce marqueur, le marqueur suivant et le précédent. La vitesse de propagation est donnée par le modèle de propagation (RoS) et le front avant est reconstitué par la projection du marqueur à la position correspondant à la durée de combustion.

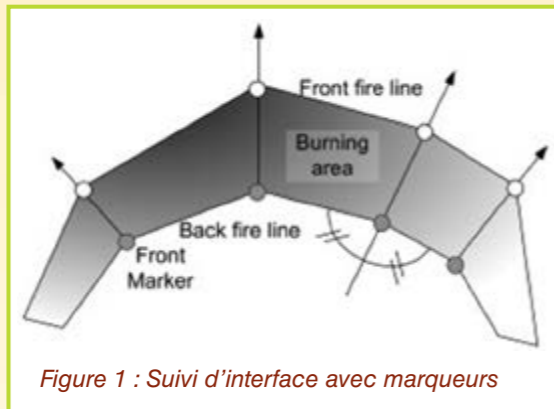


Figure 1 : Suivi d'interface avec marqueurs

Le problème principal de cette méthode provient des problèmes de topologies du front, en cas d'intersections de marqueurs et du raffinement du front lors de son expansion. Une vérification explicite de ces événements doit être effectuée pour maintenir l'intégrité de ce front.

L'utilisation de la simulation à événements discrets simplifie ces vérifications. En effet, les marqueurs ne sont pas tous advectés de manière synchrone à pas de temps fixes, mais chaque marqueur avance indépendamment, utilisant un pas de temps local dépendant de sa vitesse.

3. Intersections et raffinement

Le nombre de marqueurs est dynamique, des points sont ajoutés ou supprimés pour éviter les intersections et maintenir une distribution régulière sur tout le front.

Chaque marqueur ne pouvant avancer d'une distance plus grande que la résolution, la recherche d'intersections n'est effectuée que sur les marqueurs éloignés d'une distance inférieure à cette résolution.

4. Modèle de vitesse de front de flamme

Le modèle de vitesse de front de flamme est basé sur le rayonnement. Une formulation non-stationnaire du modèle permet de résoudre numériquement les phénomènes d'extinction et d'accélération (Figure 2) du front de flamme. Le traitement numérique doit prendre en compte l'épaisseur instantanée du front de flamme, à une résolution bien inférieure au mètre, ce qui constitue un défi pour des simulations de longueurs de front de flamme de plusieurs kilomètres. La méthode développée utilise les fronts historiques simulés pour les bilans locaux et une implantation efficace.

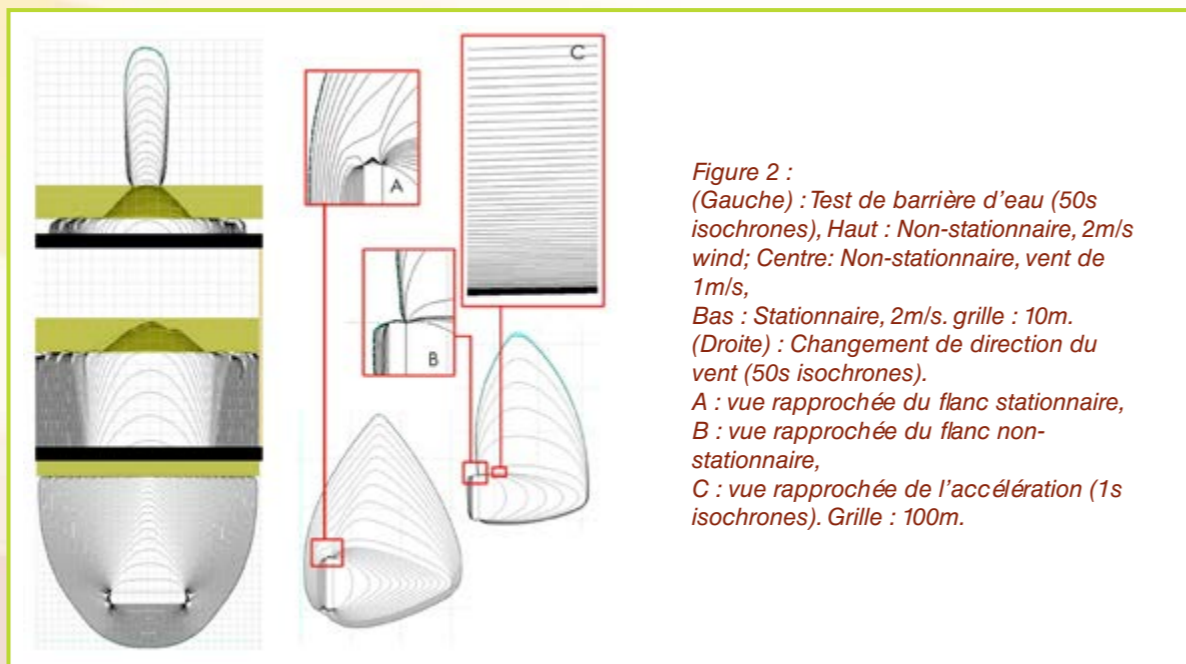


Figure 2 :
 (Gauche) : Test de barrière d'eau (50s isochrones), Haut : Non-stationnaire, 2m/s wind; Centre: Non-stationnaire, vent de 1m/s, Bas : Stationnaire, 2m/s. grille : 10m.
 (Droite) : Changement de direction du vent (50s isochrones).
 A : vue rapprochée du flanc stationnaire,
 B : vue rapprochée du flanc non-stationnaire,
 C : vue rapprochée de l'accélération (1s isochrones). Grille : 100m.

5. Validation sur le cas de Lançons

L'incendie de Lançons de Provence a eu lieu en juillet 2005, brûlant plus de 800 Hectares de forêts et garrigues. Un vent de nord-ouest soufflant à plus de 50 Km/h et une grande sécheresse marquant un risque particulièrement élevé d'incendie. Ce cas a constitué le premier exercice de simulation sur un vrai incendie, exercice initié par le GDR incendie.

L'intérêt de ce feu est la très bonne documentation de l'accident, avec plusieurs contours disponibles décrivant l'avancement du front (à 9h40, 12h, 14h30, 16h30), ainsi qu'une bonne connaissance de la végétation.

La carte des vents (champ statique) a été réalisée avec le logiciel (Fluent) et mise à disposition des équipes de recherches par le GDR. La résolution de la carte des vents est identique à celle du modèle de terrain, soit 50mx50m. Les simulations ont été réalisées avec une résolution de dix mètres, et un pas d'intégration spatial de moins d'un mètre. Pour cette résolution, le temps de simulation fut inférieur à 2 minutes sur station de travail, ce qui fait de ce code à la fois le plus précis (en résolution) et le plus rapide des codes présentés lors du GDR. La précision de dix mètres est particulièrement importante parce qu'elle permet de prendre en compte les routes et les petites zones d'habitation dans les simulations. Une résolution inférieure limite fortement l'application de modèle de propagation puisque ces zones relativement petites ont une grande influence sur la propagation de l'incendie. Les cartes de combustibles sont traitées dans le simulateur comme un ensemble de polygones, directement issus des systèmes d'informations géographiques.

6. Paramètres du combustible

Le modèle de propagation utilisé pour ce cas prend en compte 4 paramètres, synthétisant l'efficacité de la combustion, la création de suie, la vitesse des gaz et la quantité d'humidité. Si les trois premiers paramètres sont connus pour les végétaux constituant le combustible (ici essentiellement de la garrigue), le taux d'humidité, tout comme le vent réel près du front sont mal connus, et la vitesse potentielle est estimée à partir du premier contour de feu.

Les résultats de la simulation avec paramètres optimaux sont présentés en Figure 3.

L'incertitude sur l'humidité du végétal ne permet toutefois pas de proposer précisément la position du front de flamme. Un intervalle de confiance sur les résultats de simulation est réalisé en simulant le même incendie avec des paramètres minimum (pessimiste) et maximum (optimiste) d'humidité dans le végétal.

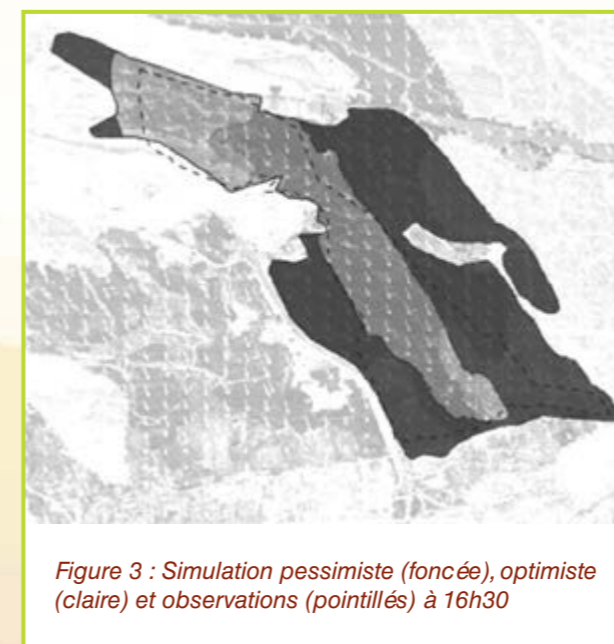


Figure 3 : Simulation pessimiste (foncée), optimiste (claire) et observations (pointillés) à 16h30

Les résultats de simulation ont montré que le simulateur est tout à fait capable de reproduire l'incendie, les zones de débordement, particulièrement évidentes dans la simulation pessimiste correspondent aux zones d'attaques de la sécurité civile, et l'on peut ainsi juger de l'efficacité des moyens. Toutefois, au-delà de la nécessité de bien connaître le combustible, il apparaît très important de bien connaître le vent autour du feu, car celui-ci semble avoir une importance au moins aussi importante que la topographie sur le déroulement de l'incendie.

7. Inter comparaison

Une autre phase d'inter comparaison a débuté en 2010 pour le programme EU Proterina 3 [9]. Dans le cadre de ce programme, 8 simulations ont été réalisées en collaboration avec l'Université de Sassari (Sardaigne), plusieurs champs diagnostics étant comparés entre le logiciel utilisé en Sardaigne (Farsite, code américain datant de 1995 largement utilisé par les services forestiers mondiaux) et notre code. Un exemple de ces simulations comparées est présenté en Figure 6, il a montré que les résultats étaient assez comparables, l'intérêt du code ForeFire étant sa rapidité de calcul (20 fois plus rapide) et la résolution (<2m) permettant de prendre en compte les détails critiques (routes, chemins, crêtes).

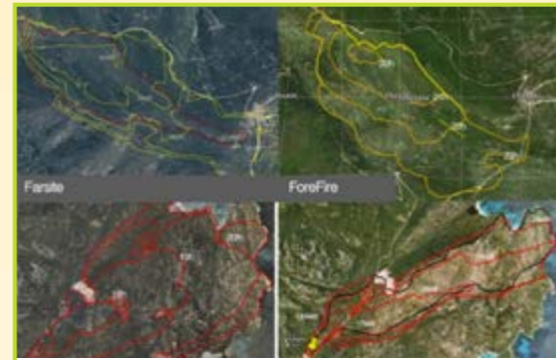


Figure 6 : Comparaison entre ForeFire et Farsite sur deux grands incendies, Ospolo, Sardaigne (haut) et Suartone, Corse (bas).

8. Développements applicatifs terrain

En marge du travail de modélisation, paramétrisation et de développement des codes parallèles, une part non négligeable du travail de développement de code consiste à développer des outils basés sur ces codes étant transposables sur le terrain. Deux applicatifs ont ainsi été créés, une version pure web, où la simulation est effectuée sur les serveurs du laboratoire (Figure 7) et un applicatif pour station de travail permettant le travail hors ligne et l'accès à des diagnostics plus poussés.

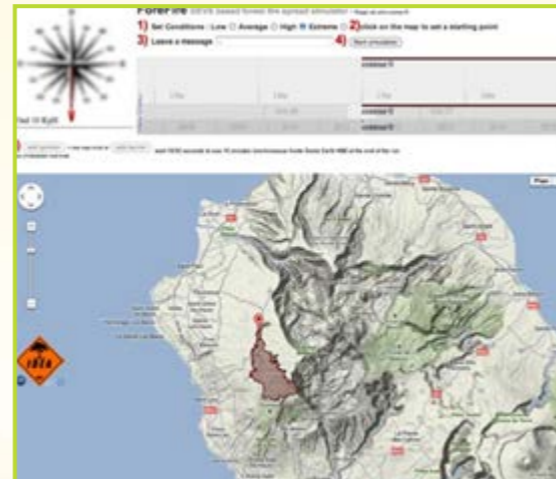


Figure 5 : Simulation pessimiste (foncée), optimiste (claire) et observations (pointillés) à 16h30

9. Conclusion

Le code ForeFire est en passe d'être validé et utilisé par les services incendies en Corse pour réaliser les exercices ainsi que les retours sur expériences. Des essais réussis de couplages entre feu de forêt et atmosphère constituent la direction actuelle de recherche pour l'amélioration du modèle [10] et ont un autre objectif, celui de permettre la simulation des très grands feux dans de grands centres de calculs. A l'image de ce qui existe dans le domaine de la pollution marine, des précipitations intenses ou des cyclones, la disponibilité d'un tel code pourrait permettre de réaliser des simulations à grandes échelles de grands incendies à forts risques comme il en existe plusieurs chaque année en Europe. La dimension de ces feux, leurs impacts en termes d'émissions de polluantes et leurs durées font que le développement de ces événements est fortement lié aux conditions météorologiques.

10. Bibliographie

- [1] Sullivan, A.L., 2007. « A review of wildland fire spread modelling, 1990-present 3 : Mathematical analogues and simulation models » arXiv:0706.4130v1 [physics.geo-ph].
- [2] Grishin A.M., 1996. Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them, (F. Albini, Editor) Publishing House of the Tomsk State University.
- [3] Morvan D., Dupuy J.L., 2004. Modelling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation Combustion & Flame, Vol.138, pp.199-200.
- [4] Linn R., Reisner J., Colman J.J., Winterkamp J., 2002. Studying wildfire behaviour using FIRETEC, Int. J. of Wildland Fire, Vol.11, pp.233-246.
- [5] B. Porterie, J.L. Consalvi, A. Kaiss, J.C. Loraud, 2005. « Predicting Wildland Fire Behavior and Emissions Using a Fine-Scale Physical Model », Numerical Heat Transfer A 47(6), 571-591.
- [6] Balbi J.H., Rossi J.L., Marcelli T., Santoni P.A., 2007. A 3D physical real-time model of surface fires across fuel beds, Combustion Science and Technology, 179, 2511-2537.
- [7] Balbi J.H., Morandini F., Silvani X., Filippi J.B., Rinieri F., 2009. A Physical Model for Wildland Fires. hal-00593608, Combustion and Flame, 156 (12), pp. 2217-2230, DOI : 10.1016/j.combustflame.2009.07.010
- [8] Filippi J. B., Morandini F., Balbi J.H., Hill D., 2009. Discrete event front tracking simulator of a physical fire spread model. hal-00438619, Simulation, 86 (10), pp. 629-644, DOI : 10.1177/0037549709343117.
- [9] Santoni P.A., Filippi J.B., Balbi J.H., Bosseur F., 2011. Wildland Fire Behaviour Case Studies and Fuel Models for Landscape-Scale Fire Modeling. hal-00647897 Journal of Combustion, Article ID 613424, 12 p. DOI : 10.1155/2011/613424
- [10] Filippi J.B., Bosseur F., Xavier Pialat, Santoni P.A., Strada S., Mari C., 2011. Simulation of coupled fire/atmosphere interaction with the MesoNH-ForeFire models. hal-00593735 Journal of Combustion, available online.

11. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR IDEA financé par l'agence nationale de la recherche dans le programme COSINUS. Référence ANR-09-COSI-06.

Comité d'organisation

Responsables

Dr Jean-Louis Rossi (Université de Corse Pasquale Paoli)
M. Jean-François Andreozzi (Parc Naturel Régional de Corse)

Membres

Dr Dominique Cancellieri (Université de Corse Pasquale Paoli)
M. Mathieu Estevas (Parc Naturel Régional de Corse/Université de Corse Pasquale Paoli)
Mme Sylvia Flore (Université de Corse Pasquale Paoli)
M. Étienne Grisoni (Parc Naturel Régional de Corse)
Dr Thierry Marcelli (Université de Corse Pasquale Paoli)
Dr Lucile Rossi (Université de Corse Pasquale Paoli)
Mme Marie Françoise Saliceti (Université de Corse Pasquale Paoli)

Comité scientifique

Dr Valérie Cancellieri-Leroy (Université de Corse Pasquale Paoli)
Dr François-Joseph Chatelon (Université de Corse Pasquale Paoli)
Dr Lila Ferrat (Université de Corse Pasquale Paoli)
Dr Jean-Baptiste Filippi (Université de Corse Pasquale Paoli)
Dr Eric Innocenti (Université de Corse Pasquale Paoli)
Dr Eric Leoni (Université de Corse Pasquale Paoli)
Dr Frédéric Morandini (Université de Corse Pasquale Paoli)
Dr Albert Simeoni (Worcester Polytechnic Institute, Boston - USA)