

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à l'École Pratique des Hautes Études

Comprendre les grands feux de forêt pour lutter en sécurité

École doctorale de l'EPHE – ED 472

Spécialité : Systèmes Intégrés, Environnement et Biodiversité

Soutenue par :

Sébastien LAHAYE

le 22 octobre 2018

Dirigée par :

Christelle HELY

Institut des Sciences de l'Evolution Montpellier

Thomas CURT

IRSTEA Aix-en-Provence

COMPOSITION DU JURY :

M. Domingos Xavier VIEGAS

Professeur, ADAI Coimbra, Portugal
Président

M. Johann GOLDAMMER

Professeur, GFMC Friburg, Germany
Rapporteur

Mme Frédérique GIROUD

Docteur, CEREN Aix-en-Provence, France
Examinatrice

Mme Marta MIRALLES

Catalonian Fire Service, Barcelone, Spain
Invitée



École Pratique
des Hautes Études



*A Marie-Paule et Fabien, qui ont ouvert le chemin,
A Carole, radieuse compagne, quel que soit le chemin,
A Tanouk et Fany, pour qu'aussi heureux que le nôtre soit leur chemin.*

*« Nous sommes tous des visiteurs de ce temps,
de cet endroit.*

Nous sommes en transit.

*Notre but ici est d'observer, d'apprendre, d'entretenir,
d'aimer... puis de retourner à la maison. »*

Proverbe aborigène australien

Table des matières

Table des illustrations	8
Remerciements.....	11
Préambule	13
Introduction	15
Les feux de forêt : une problématique grandissante	15
La stratégie de lutte en France	16
D'autres approches dans le monde	18
Caractérisation des conditions et comportements des feux dangereux en France.....	19
Les feux qui piègent les pompiers à travers le monde.....	20
Vocation opérationnelle du doctorat.....	21
Chapitre I: marqueurs des feux dangereux en France méditerranéenne	23
Résumé	23
What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France?.....	25
Abstract	25
Introduction.....	26
Materials and methods	27
Results.....	30
Discussion	33
Conclusion	36
Acknowledgements.....	36
Chapitre II: contribution de la météorologie et de la topographie dans les accidents de pompiers en Australie	37
Résumé	37
How do weather and terrain contribute to firefighter entrapments in Australia?.....	39

Abstract	39
Introduction	40
Method	41
Results	45
Discussion	49
Conclusion	53
Acknowledgements	53
Chapitre III: Comportements du feu dynamiques et accidents	55
Résumé	55
Dynamic fire behaviour conditions in firefighter entrapments	57
Abstract	57
Introduction	58
Data and methods	59
Results	63
Discussion	66
Conclusion	69
Acknowledgements	69
Discussion	71
Etudier et classer les feux : un défi relevé	71
Variabilité intercontinentale	73
Des comportements du feu dangereux aux accidents	75
Transposer l'expertise pour les pompiers	77
Prévention	78
Formation	79
Anticipation	79
Organisation opérationnelle	80
Retour d'expérience	80
Conclusion	83
Références bibliographiques	85

Annexe 1: Classification des grands feux en France	99
Annexe 2: Feux avec accident en Australie étudiés dans le chapitre II.....	117
Annexe 3 : Feux sans accidents utilisés en référence dans le chapitre II.....	123
Annexe 4 : Accidents étudiés dans le chapitre III	127

Table des illustrations

Introduction

Figure 1. Explications traditionnelles de la propagation d'un feu de forêt.

Figure 2. Déclinaison de la stratégie d'attaque des feux naissants dans les activités des pompiers en France.

Figure 3. Exemple de chaîne de commandement à 7 niveaux.

Figure 4. Un exemple d'effet vortex sur pente déventée, ou VLS, en 2017 en Corse (Photo : P. Schaller).

Chapitre I

Figure 5. Location of the four homogeneous pyroregions in southern France, from Fréjaville and Curt (2015).

Figure 6. For pyroregions P1–P4, number of fires according to their size in logarithmic scale.

Figure 7. For pyroregions P1–P4, influence of fine fuel moisture code (FFMC), duff moisture code (DMC), drought code (DC), Fire Weather Index (FWI), WIND, relative humidity (RH) and temperature (TEMP) on the size of fires.

Figure 8. Comparison of the fire size and the weather variables for fires with entrapment (TRAP) and without entrapment (SAFE).

Chapitre II

Figure 9. Location of entrapment and reference fires.

Figure 10. Distribution of entrapments regarding (a) final size of fire, (b) time of the day, (c) time since ignition and (d) type of fuel.

Figure 11. Number of entrapments (TrapNb), deaths, injured firefighters (Injur) and destroyed vehicles (Lost) reported per year.

Figure 12. Density curve of TRAP (red) and SAFE (blue) for each investigated predictor.

Figure 13. Predictions from the model of entrapment probability depending on wind for different values of ruggedness (Rugd) and relative humidity (H).

Chapitre III

Figure 14. Location of entrapments.

Figure 15. Correlation circle resulting from Principal Component Analysis on weather and terrain descriptors.

Figure 16. Distribution of weather and terrain descriptors for each type of fire: topography-driven (T1), wind-driven (T2) and convective (T3).

Figure 17. Relations between factors (wind 'shift', 'attachment' on steep slope, 'canyon' configuration and vorticity-driven lateral spread 'VLS') associated with entrapment.

Figure 18. Density of distance between VLS prone slope and entrapment position ('VLS distance') for wind-driven fires (T2) and convective fires (T3).

Discussion

Figure 19. Conceptualisation des améliorations à apporter à l'organisation actuelle des services incendie pour intégrer les situations et configurations dangereuses mises en évidence dans cette étude.

Remerciements

La recherche scientifique est un long parcours, une épreuve individuelle qui peut être émaillée de moments de solitude... Cependant, la recherche solitaire n'aurait que peu d'intérêt. Le travail présenté ici est le fruit de nombreuses contributions ; il est riche de ces interactions entre spécialistes, passionnés du sujet « feu de forêt ».

Je veux d'abord remercier Christelle Hély et Thomas Curt, deux directeurs de recherche qui m'ont totalement et efficacement soutenu tout au long du projet. A l'origine, ils ont immédiatement été séduits par l'idée de ce doctorat et m'ont fait part de leur enthousiasme. Par la suite, ils sont restés disponibles et ont su apporter les conseils nécessaires, prenant parfois une part active dans les analyses et compensant ainsi par leur expertise mes lacunes initiales dans la maîtrise de certains outils scientifiques. Thibaut Frejaville, Laure Paradis, Marine Pasturel et Owen Price ont également contribué à ce soutien technique.

Pendant quatre ans, le doctorat a été financé par le Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches-du-Rhône (SDIS 13). Nous le devons aux deux directeurs visionnaires qui se sont succédés à la tête du SDIS : le colonel Luc Jorda, qui a validé le projet, puis le contrôleur général Gregory Allione, qui l'a maintenu. Si les derniers temps du doctorat se sont déroulés sans financement, je dois néanmoins à Jean-Michel Dumaz et Géraud Parjadis de m'avoir proposé un contrat et donc une situation au Safe Cluster, permettant de continuer à développer des projets tout en terminant la rédaction de ce mémoire.

Au sein du SDIS 13, beaucoup de collègues et amis ont également apporté leur contribution en témoignant les expériences vécues lors de feux : Frédéric Vaucouleur, Frédéric Maggiani, Jean-François Petit, Vincent Pastor, Jean-Jacques Pourchier, Christophe Garcia, Marc Dumas, Alain Fonters, Jean-Paul Monet, Marc Nélias, Gérard Franceschi, Bruno Desantis, Xavier Joseph, Patrice Tissot... J'oublie certainement beaucoup de monde et j'en suis désolé.

Plusieurs autres services d'incendie et de secours m'ont aimablement ouvert leurs archives, souvent grâce à des contacts informels établis par le biais du réseau « brûlage dirigé » ou de connaissances antérieures : Jean-Luc Beccari, Jean-Michel Saluzzo, André Giorgi, Jean-Louis Nicolai, Louis-Jean Olivier, Patrice Vernet, Jean Christophe Pasquini, Michel Persoglio, Jean-Jacques Bozabalian, Christophe Frerson, Pierre Schaller, Christian Benoit, Guillaume Defudes, Pierre Augier, Patrick Resplandy, Christophe Olive, Christophe Bourely, Nicolas Coste, Jean-Paul Baylac... là aussi, j'oublie certainement de précieux contacts.

A l'Office National des Forêts d'une part, et à Météo France d'autre part, quelques cadres concentrent une expertise exceptionnelle qu'ils ont accepté de partager tout en ouvrant leurs bases de données : Yvon Duché, Fabien Garbati, Jean-Yves Duret, Antonella Massaiu, Florence Vaysse, Eric Bertrand, François Saix, Philippe Albert.

A l'étranger ensuite, il y a d'abord les amis catalans, avec qui nous avons développé tant de projets ces dernières années. Marc Castellnou est une source d'inspiration permanente et Marta

Miralles, Oriol Vilalta, Jordi Vendrell, Mariona Borrás, Nuria Prat, Anna Fabrega et les autres sont d'infatigables partenaires.

Et puis, bien plus loin, il y a les équipes rencontrées en Australie. Steve Yorke puis Simon Heemstra et Stuart Matthews ont été les points d'entrée dans le New South Wales Rural Fire Service ; je ne remercierai jamais assez Steve pour son hospitalité. John Haynes, de son côté, m'a ouvert l'accès au Country Fire Authority du Victoria. *Last but not least*, ce projet doit beaucoup à Jason Sharples et à son équipe à l'University of New South Wales, Canberra: Nick Goldie, Rachel Badlan... Quant à moi, je dois beaucoup à Jason, ce professeur dont l'expertise n'a d'égale que ses qualités humaines.

Pour finir, je veux remercier les scientifiques qui ont consacré du temps pour évaluer et surtout enrichir ce doctorat : Jean-Luc Dupuis, Claude Picard et Dominique Morvan qui ont constitué les comités de thèse, et bien évidemment Johann Goldammer, Domingos Viegas et Frédérique Giroud qui ont accepté de composer le jury.

Beaucoup des « Grands » du feu de forêt, de ceux dont les savoirs et l'expertise font référence à travers le monde, ont donc contribué au travail présenté ici. J'en suis conscient et honoré.

Préambule

Le doctorat présenté dans ce mémoire compte plusieurs particularités : réalisé par un pompier professionnel, il a été effectué en formation continue pendant cinq ans, avec une année de césure.

En 2012, je suis officier sapeur-pompier dans le sud de la France depuis quinze ans quand je démarre ce travail. Comme tous mes collègues, je suis formé pour faire face à une multitude de risques, pour gérer des crises de natures très diverses : accidents de personnes, feux urbains, feux industriels, risques technologiques, risques naturels... Exerçant en région méditerranéenne, je suis confronté, entre autres, aux feux de forêts. Particulièrement intéressé par le sujet, je me suis spécialisé dans la pratique du brûlage dirigé et du feu tactique. Je pense alors qu'il est possible, et souhaitable, de poursuivre des études approfondies pour mieux comprendre cet aléa feu de forêt, comprendre ce qui guide le comportement du feu pour améliorer l'organisation de la lutte. C'est le point de départ de ce doctorat.

Deux directeurs de recherche se montrent rapidement séduits par le projet et proposent d'encadrer les travaux : le Docteur Christelle Hély et le Docteur Thomas Curt. Leur soutien permanent aura créé les conditions d'une collaboration fructueuse.

Souhaitant continuer à exercer ma profession pendant les recherches, l'Ecole Pratique des Hautes Etudes m'accueille en formation continue. Mon employeur à cette époque, le Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches-du-Rhône (SDIS 13), accepte de financer le projet ; une convention est établie.

Le SDIS 13 est alors impliqué dans plusieurs actions collaboratives internationales, qui me permettent de découvrir, dès le début des recherches, comment la thématique des feux de forêts est abordée ailleurs en Europe (en Espagne notamment), aux Etats-Unis et en Australie. Fort de cette ouverture, je propose à nos contacts australiens du New South Wales Rural Fire Service de monter un projet dans la continuité des travaux de doctorat : il s'agit à la fois de mieux appréhender la spécificité des incendies et de la lutte sur cet autre continent, mais aussi de partager les compétences que j'ai pu acquérir sur le sujet en Europe.

Le projet australien se concrétise en 2017. Je quitte alors les fonctions de pompier en France pour rejoindre pendant un an l'équipe de recherche du Professeur Jason Sharples à l'Université du New South Wales, Canberra. Formellement, il s'agit d'une année de césure dans le doctorat. En réalité, les travaux menés et publiés durant cette année vont largement contribuer aux résultats présentés ici.

Durant les six années qui séparent le début des travaux de la rédaction de ce mémoire, d'autres équipes de recherche ont évidemment publié des résultats nouveaux. Ces résultats ont fait évoluer notre questionnement et, in fine, ont enrichi notre réflexion.

La manière dont le doctorat a été mené, et ce mémoire rédigé, est donc largement influencée par l'objectif d'arriver à des résultats susceptibles de faire évoluer les pratiques professionnelles des pompiers, tout en suivant une démarche scientifique.

Introduction

Comme tout phénomène de combustion, l'incendie de forêt est une réaction exothermique. Si l'on s'en tient aux modèles linéaires de propagation (Figure 1a), la réaction se propage de proche en proche selon le principe de Huygens (Anderson *et al.* 1982) et crée un front de flamme auquel sont confrontés les pompiers pendant la lutte. Plus la ligne est longue et les combustibles importants, plus l'énergie dégagée est conséquente et plus les pompiers sont mis en difficulté. Les facteurs influençant l'intensité de la combustion s'articulent autour d'un 'triangle du feu' (Figure 1b) dont les trois côtés sont, s'agissant d'un feu de forêt : le combustible, la météorologie et la topographie (Chandler *et al.* 1983; Trabaud 1992). Ainsi, si l'on suit cette modélisation classique de l'incendie, l'intensité est d'autant plus importante que la végétation est dense et haute, que le vent est fort et que la pente est montante.

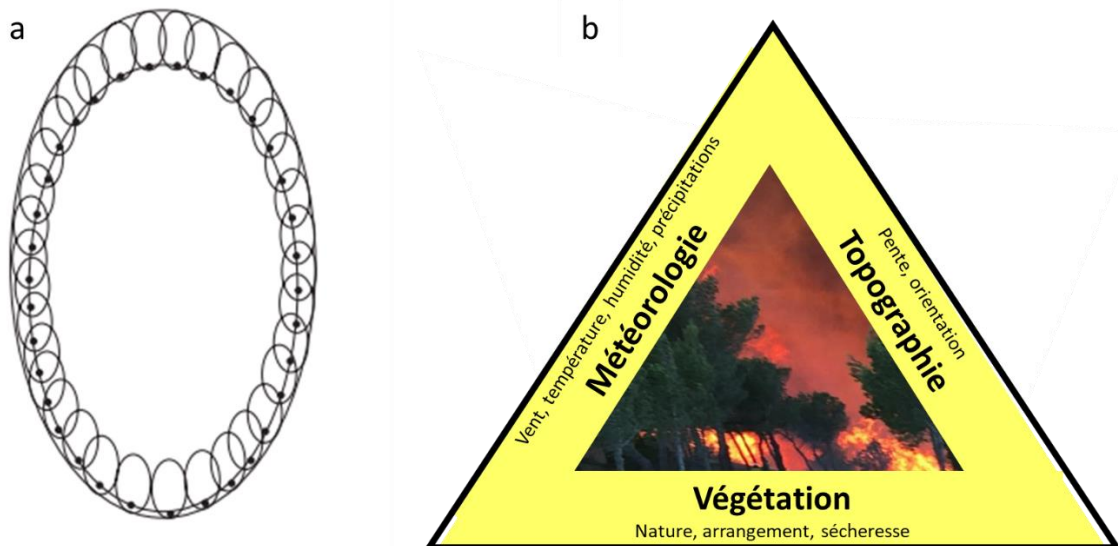


Figure 1. Explications traditionnelles de la propagation d'un feu de forêt.
(a) Selon le principe de Huygens, propagation de proche en proche créant une forme elliptique si les conditions de pente et de vent sont uniformes (schéma extrait de Finney 1998). (b) Triangle du feu appliqué à l'incendie de forêt.

Les feux de forêt : une problématique grandissante

Cependant, il semble qu'au-delà de certaines conditions environnementales, la caractérisation traditionnelle des incendies et de leur comportement ne soit plus pertinente et qu'une nouvelle stratégie doit s'imposer. Dans plusieurs régions du monde, en effet, les feux de forêts deviennent de plus en plus fréquents et violents (San-Miguel-Ayanz *et al.* 2013; Sharples *et al.* 2016). Cette évolution est le résultat du changement global, c'est-à-dire à la fois du réchauffement climatique accompagné d'épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents et sévères (Goldammer and Furyaev 1996; Moritz *et al.* 2012), et du recul de pratiques ancestrales d'aménagement rural du territoire et de gestion forestière qui favorisent l'accumulation des combustibles et leur connectivité paysagère (Moreira *et al.* 2011; Gammage 2012).

Aussi, les incendies affectent des territoires où les enjeux humains sont nombreux (Bowman *et al.* 2017), notamment en raison des infrastructures et des interfaces forêts-habitats qui se sont multipliées. C'est le cas en particulier en Europe méditerranéenne, dans les états de l'ouest des Etats-Unis ou encore sur le littoral australien. Dans ces régions du monde, l'incendie est considéré comme un risque auquel il faut faire face avec l'objectif impérieux de protéger les populations. Les politiques publiques y consacrent une large part des moyens aux services incendie, chargés de lutter contre les feux.

La stratégie de lutte en France

En France, la zone méditerranéenne est la plus sensible aux incendies, avec près de 1700 départs de feux par an et 8200 ha brûlés par an en moyenne (www.Promethee.com, statistiques 2013-2017). Les moyens s'y articulent autour d'une stratégie qui a été élaborée dans les années 1990, suite à plusieurs grands incendies (Battesti 1997). Elle repose sur une méthode fine de prédiction du risque météorologique quotidien, sur la sensibilisation du public et sur des restrictions d'accès aux massifs les jours les plus à risque. Mais avant tout, la pièce majeure du dispositif est l'attaque rapide et massive des feux naissants (Direction de la Sécurité Civile 1994) : détection précoce des éclosions, pré-mobilisation des moyens terrestres et aériens et concentration de ces moyens dans les premières minutes.

Mon parcours professionnel m'a permis d'appréhender les impératifs et les mécanismes qui guident l'organisation de la lutte. Ainsi, fortement influencée par « l'attaque des feux naissants », la stratégie française est guidée par l'idée de déployer des moyens terrestres et aériens sur toute la périphérie du feu, quelque en soit la virulence (Direction de la Sécurité Civile 1994). De cette stratégie découle la structuration de plusieurs activités pour les sapeurs-pompier, à savoir la prévention, la formation, l'anticipation et enfin l'organisation opérationnelle (Figure 2).

Bien en amont de la lutte, la 'prévention' consiste notamment à aménager les massifs par la création et l'entretien de pistes et de points d'eau pour permettre aux camions de lutte de circonscrire les incendies (Département de l'Aude 2008). Aujourd'hui, on entretient les pistes existantes, par le débroussaillage notamment, plus qu'on en crée (Réseau Coupures de combustible 2009), et les priorités d'entretien se portent sur les pistes où les pompiers sont supposés pouvoir faire face au panneau radiant de l'incendie (Bisgambiglia *et al.* 2017).

Concernant la formation, l'apprentissage des pompiers pour faire face aux feux de forêt est découpé en cinq niveaux, en fonction du niveau de responsabilité (Direction de la Sécurité Civile 2009). Effectuées sur le terrain ou en réalité virtuelle, ces formations visent toutes à acquérir une méthodologie et à développer des automatismes dans l'emploi des outils de lutte, qu'ils soient terrestres (camions et équipages) ou aériens (avions et hélicoptères). Compte-tenu de la place occupée dans ces formations par l'acquisition de la méthodologie, la découverte et la compréhension du comportement du feu n'y occupent, au final et peut-être contre toute logique, qu'une part minime.

L'anticipation, quant à elle, consiste à préparer les moyens de lutte à l'approche d'une période à risque. Les services d'incendie s'appuient dans le sud de la France sur l'Indice Forêt Météo, un indicateur originellement développé au Canada (Van Wagner 1987), qui a été adapté au contexte français et qui est actualisé chaque jour par Météo France pour prédire le risque

d'ignition et une vitesse moyenne de propagation dans chacune des 119 zones, 668 km² en moyenne, préalablement identifiées comme homogènes en terme d'influence météorologique (Météo France, Ordre de service feu de forêt 2016, non publié). Selon le niveau de risque ainsi défini, des pompiers sont mobilisés en renfort dans les casernes ou déployés dans les massifs. Des avions sont également placés en préalerte ou mis en vol pour des « guets aériens armés » (Etat-major interministériel de zone sud, Ordre zonal d'opérations feu de forêt 2017, non publié).

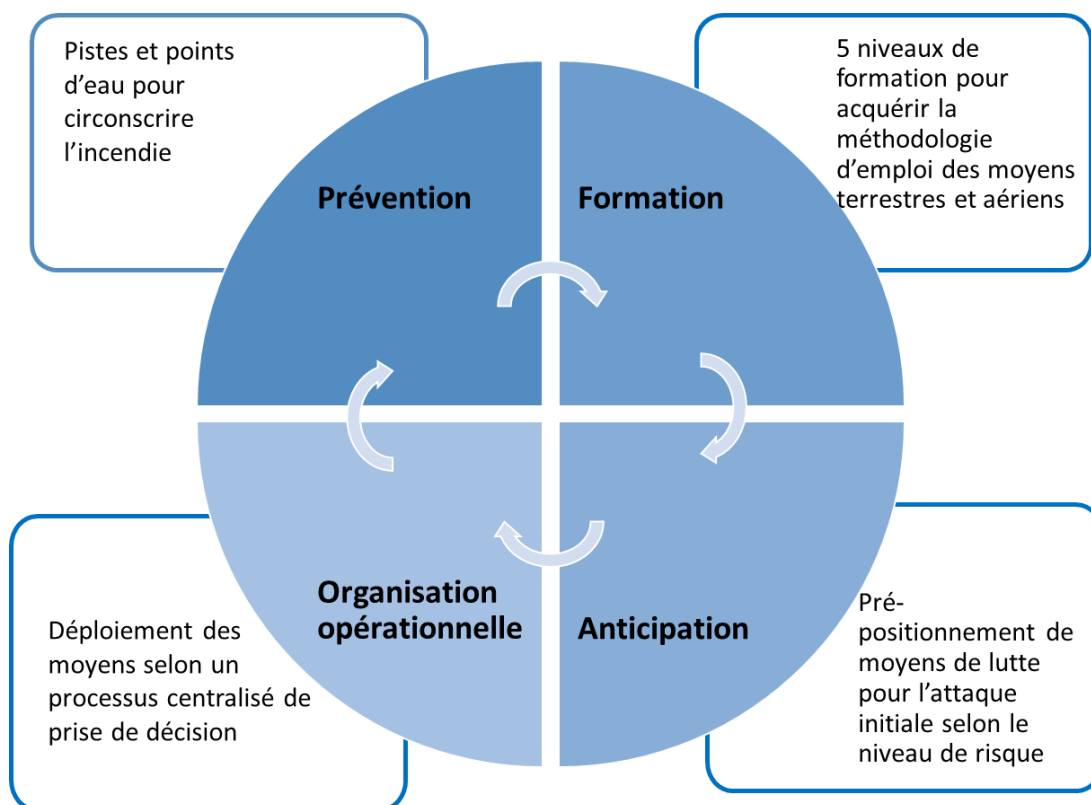


Figure 2. Déclinaison de la stratégie d'attaque des feux naissants dans les activités des pompiers en France.

Enfin, l'organisation opérationnelle vise à déployer sur le terrain les moyens de lutte lorsqu'un feu est déclaré. Le déploiement obéit à une structure très hiérarchisée dans laquelle toutes les décisions sont prises par le commandant des opérations de secours, au sommet de la chaîne de commandement, en fonction des nombreuses informations qui émanent du terrain (Schaller 2004). Plusieurs éléments entravent la bonne application du processus décisionnel : nombre d'intermédiaires dans la chaîne (Figure 3), difficultés techniques de communication, latence liée à la mobilisation de groupes indissociables de véhicules pompe lourds transportant du personnel, du matériel et de l'eau. Compte tenu du processus décisionnel centralisé et de ces entraves, les personnels sur le terrain n'ont pas la flexibilité nécessaire pour réagir aux évolutions rapides des incendies qui ont échappé à l'attaque initiale et pris de l'importance, notamment lorsque ces feux développent des comportements dangereux.

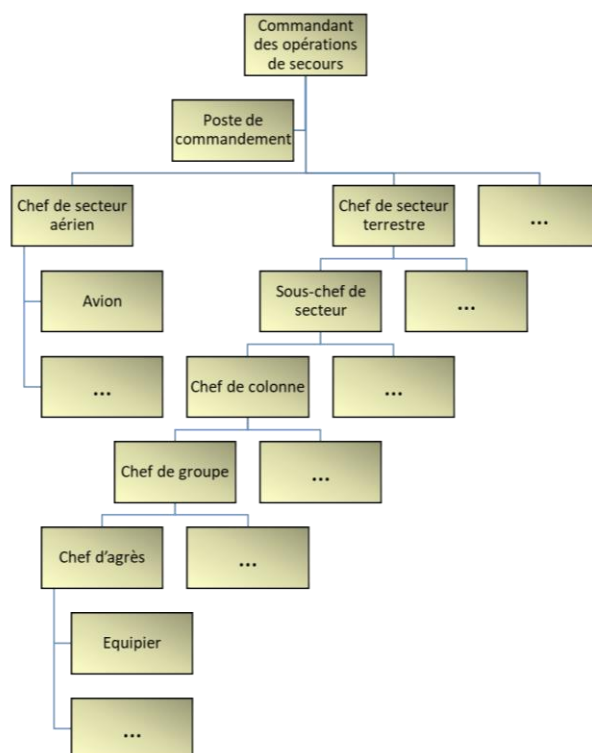


Figure 3. Exemple de chaîne de commandement à 7 niveaux.

La stratégie française d'attaque des feux naissants, telle qu'elle est déclinée à travers les différentes activités des sapeurs-pompiers, s'intéresse peu au comportement du feu et ne prévoit pas de modulation pour les grands incendies qui ont échappé à l'attaque initiale. Cette stratégie a certes conduit à une nette diminution des surfaces annuelles brûlées (Turco *et al.* 2016) ; cependant, en France comme ailleurs, certains feux, particulièrement dévastateurs, continuent à parcourir le paysage (Curt and Frejaville 2017) et, régulièrement, des pompiers sont piégés (Chevrou 2005). Plusieurs sépultures sont érigées pour le rappeler dans les collines provençales où j'exerce ma profession et certains de mes collègues ont vécu des expériences tragiques (Maggiani and Maggiani 2012).

D'autres approches dans le monde

Les échanges avec des services de lutte contre l'incendie de différents pays nous apprennent que les orientations stratégiques ont pu être différentes d'un endroit à l'autre durant ces dernières décennies. On note ainsi qu'en Amérique du Nord comme en Australie, une place grandissante est donnée aux analystes du feu. Il s'agit de techniciens expérimentés, spécialisés dans la prédiction et l'analyse du comportement du feu. Ces analystes possèdent des compétences en météorologie, sciences de l'incendie et dynamique forestière. Ils ont généralement une bonne expérience terrain des incendies et une bonne connaissance des moyens de lutte et de leurs limites.

Employés par les services de lutte, ils sont détachés de toute tâche de commandement et ont une position de conseiller technique. Au-delà de l'aide à l'anticipation pour préparer les jours à risque, ils assurent une mission essentielle lors des grands feux dans le poste de commandement où ils sont chargés de prédire le développement de l'incendie (Hardy and Hardy 2007; Gibos *et al.* 2014). Pour mener à bien leurs missions, ils bénéficient de toutes les

sources d'information disponibles afin d'évaluer la situation : compte-rendu terrain, imagerie aérienne ou satellite, données météorologiques... Ils s'appuient enfin sur des outils de simulation adaptés au contexte régional de développement des feux.

En Europe, Molina *et al.* (2010) ont détaillé comment la lutte pourrait bénéficier d'une pareille activité d'analyste. Le Service Incendie de Catalogne a, depuis, pleinement développé et utilisé le modèle (Otero and Nielsen 2017) mais les autres services de lutte sud européens tardent à s'engager dans la même voie.

Caractérisation des conditions et comportements des feux dangereux en France

En l'absence de professionnels experts du comportement des incendies au sein des services de lutte, les liens entre type de feu et difficulté ou dangerosité de la lutte n'ont jamais été établis en France.

Ainsi, dans un travail exploratoire réalisé au début de ce doctorat, présenté oralement en 2014 lors de la VII^{ème} conférence internationale sur la recherche en feu de forêt à Coimbra, nous avons tenté d'établir une classification des grands feux en fonction de leur environnement et des difficultés de lutte qu'ils induisent. Cette étude proposait une classification par méthode statistique de regroupement de 153 grands incendies en fonction de trois paramètres : la surface finale, le rythme d'accroissement moyen de la surface et le changement de direction de l'axe du feu. Elle analysait ensuite les marqueurs météorologiques, topographiques et végétaux propres à chaque classe de feu.

Cette étude préalable a mis en lumière plusieurs limites. Tout d'abord, les paramètres et la méthode de classification choisis n'ont pas permis de trouver des classes de feu à la fois statistiquement significatives et opérationnellement cohérentes. Les marqueurs du type de végétation, ensuite, à savoir la répartition entre broussaille, forêt de feuillus, pinède et « autre couvert » dans le contour final du feu, n'ont pas donné de résultats significatifs. Enfin, la pente moyenne intégrée sur la totalité du contour de feu s'est révélée insuffisante pour décrire correctement la topographie de la zone impactée par le feu. Bien qu'ayant fait l'objet d'un article publié dans les actes de la conférence après évaluation par un comité de lecture (Lahaye *et al.* 2014), cette étude, considérée dans ce mémoire comme une étape instructive mais préliminaire, est donc seulement présentée en annexe et non pas comme un chapitre à part entière (annexe 1).

Dans le même temps, deux nouvelles sources de données ont permis de réorienter la recherche sur les marqueurs des feux dangereux en France méditerranéenne. Tout d'abord, Frejaville and Curt (2015) ont découpé la même zone d'étude en pyrorégions, permettant ainsi d'étudier les feux dangereux à l'intérieur d'entités géographiques qui présentent une homogénéité à la fois en terme de régime de feu mais aussi de conditions climatiques et topographiques. Par ailleurs, Météo France m'a transmis sa base de données mentionnant les conditions météorologiques relevées lors de 724 feux de plus de 10 ha entre 2001 et 2016. Cela a permis de disposer d'un jeu de données conséquent et de réaliser des analyses statistiques aux résultats significatifs et robustes dans la perspective d'applications opérationnelles.

Ainsi, dans le premier chapitre de ce mémoire de thèse, nous avons cherché à caractériser, pour chacune des pyrorigions de France méditerranéenne, les conditions d'aléa météorologique associées aux feux les plus violents, c'est-à-dire rapides, intenses et/ou imprévisibles dans leur progression, et donc potentiellement les plus dangereux. L'échantillonnage a porté sur 808 incendies survenus lors des quarante dernières années ; nous avons cherché les conditions associées aux feux ayant parcouru les plus grandes superficies, à ceux qui se sont développés le plus rapidement et à ceux qui ont piégé des pompiers.

Les feux qui piègent les pompiers à travers le monde

L'étape suivante a consisté à comprendre les conditions dans lesquelles les pompiers sont piégés par le feu sur d'autres continents également soumis à des incendies violents. En Amérique du Nord, des équipes de pompiers à pied, parfois parachutés, sont souvent utilisées pour lutter contre les feux et sont parfois piégées en zone isolée (Maclean 1992; Butler *et al.* 1998; Alexander and Buxton-Carr 2011). En Australie, en revanche, les pompiers opèrent généralement depuis leurs véhicules, comme en France; par conséquent, les accidents se produisent dans des conditions tactiques plus similaires (Cheney *et al.* 2001; Cruz *et al.* 2016). C'est justement en Australie que l'étude, présentée ici dans le deuxième chapitre, a été effectuée.

A l'instar de la situation en Europe, il n'existe pas en Australie d'inventaire exhaustif des conditions dans lesquelles les pompiers sont piégés. En revanche, le phénomène de bascule brutale de la direction du vent au passage d'un front météorologique y est considéré comme particulièrement dangereux (Luke and McArthur 1978; Cheney *et al.* 2001; Cruz *et al.* 2012). Dans ce deuxième chapitre, nous avons étudié la contribution des changements de direction du vent ainsi que d'autres facteurs météorologiques et topographiques dans les accidents de pompiers lors des quarante dernières années. Pour ce faire, 45 situations accidentelles sont comparées avec 45 feux de référence sans accident mais de superficies totales équivalentes.

Le troisième chapitre, enfin, s'intéresse aux types de feux ainsi qu'aux comportements du feu extrêmes, appelés comportements dynamiques, qui piègent les pompiers. A cette fin, tous les accidents, quel que soit le continent, ont été regroupés dans une base de données unique composée de 131 cas. Pour 103 de ces accidents, où la localisation précise et l'horodatage étaient suffisamment renseignés, la propagation du feu ayant mené à l'accident a été analysée en détail pour identifier la contribution de différents comportements dynamiques du feu dans les accidents. Au-delà du changement brutal de direction du vent, évoqué plus haut, les comportements dynamiques recherchés sont liés à l'effet canyon, étudié par Viegas and Simeoni (2011), et aux effets étudiés par l'équipe du Professeur Jason Sharples, avec qui j'ai travaillé en Australie : l'attachement de la flamme (Drysdale *et al.* 1992; Edgar *et al.* 2016) et l'effet vortex généré sur les pentes déventées, appelé VLS pour « Vorticity-driven Lateral Spread » (Sharples *et al.* 2012; Simpson *et al.* 2013) et illustré sur la Figure 4. Dans ce chapitre, nous avons également cherché si la contribution des différents comportements dynamiques diffère selon le type d'incendie.

Vocation opérationnelle du doctorat

Toutes les recherches présentées ici s'intéressent à des incendies passés. Les informations ont été extraites de rapports professionnels et de bases de données internes aux services et généralement non publiés. J'ai parfois complété les données manquantes en m'adressant directement aux pompiers ou forestiers présents sur place lors du feu. Il s'agit donc là d'une agrégation inédite de données éparpillées, étudiées et rendues accessibles pour la première fois.



Figure 4. *Un exemple d'effet vortex sur pente déventée, ou VLS, en 2017 en Corse (Photo : P. Schaller). La flèche blanche représente le vent dominant, la ligne pointillée indique la ligne de crête et la flèche rouge montre une saute de feu par VLS.*

Les deux premiers chapitres ont été publiés en 2018 dans *International Journal of Wildland Fire*. Le troisième chapitre a été soumis ; il est en cours de révision. Tous sont reproduits en l'état. Par la suite, la discussion générale établit le lien entre les différentes études et détaille comment les services d'incendie peuvent intégrer dans leur organisation les résultats de ces recherches pour lutter plus efficacement contre les feux et limiter la vulnérabilité des pompiers.

Chapitre I: marqueurs des feux dangereux en France méditerranéenne

Ce chapitre a été publié avec la référence suivante:

Lahaye, S, Curt, T, Frejaville, T, Sharples, J, Paradis, L, Hely, C (2018) What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France? *International Journal of Wildland Fire*, **27**(3), 155-163. <https://doi.org/10.1071/WF17087>

Il est reproduit en l'état. Cependant, les tables et figures sont réindexées pour le mémoire de thèse et les références bibliographiques sont reportées en fin de mémoire.

Résumé

Lors des grands incendies, notamment s'ils se propagent rapidement, la lutte est particulièrement difficile pour les pompiers et le risque d'accident est important. Malgré cela, les conditions qui mènent à ces feux particulièrement dangereux sont mal connues en Europe. Pour mener l'étude décrite dans ce chapitre, j'ai collecté des rapports internes des services d'incendie et de secours et je me suis entretenu avec des pompiers et forestiers. Ces rapports et entretiens portent sur les principaux incendies de ces 40 dernières années dans les régions du Sud-est de la France qui forment la zone méditerranéenne.

Avec l'accès aux bases de données de Météo France, nous avons cherché les conditions météorologiques associées aux feux de grande surface, aux feux qui se propagent rapidement en surface et aux feux qui piègent les pompiers. Nous avons utilisé une méthode statistique de régression quantile pour déterminer l'influence des différentes conditions météorologiques sur chaque catégorie de taille de feu et chaque catégorie de taux d'extension de la surface brûlée.

Les résultats montrent que la surface des plus grands feux est surtout influencée par la force du vent, hormis en Corse où ce sont les températures élevées qui se révèlent comme marqueur principal des plus grands feux. Les accidents de pompiers piégés par le feu sont également liés aux vents forts alors que les incendies qui s'étendent le plus rapidement en surface sont liés aux températures élevées.

D'une part, cela confirme que les incendies dangereux en France sont essentiellement des feux guidés par le vent ; mais cela révèle également l'existence d'un autre type de grands feux, dits 'convectifs', qui peuvent également s'avérer très dangereux. Par ailleurs, nous avons confirmé que l'utilisation de 'l'Indice Forêt Météo', ou Fire Weather Index, est tout à fait pertinente même pour déterminer le risque de ces grands incendies et le risque d'accident.

Identifier les conditions météorologiques qui mènent aux feux de forêt les plus problématiques permettra aux services d'incendie et de secours de mieux se préparer à faire face aux comportements du feu dangereux.

What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France?

S. Lahaye^{A,B,C,F}, *T. Curt*^D, *T. Fréjaville*^E, *J. Sharples*^C, *L. Paradis*^B and *C. Hély*^B

^A Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches-du-Rhône, 1 Avenue de Boisbaudran 13326 Marseille, France.

^B Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier (ISEM), Ecole Pratique des Hautes Etudes, Paris Sciences et Lettres Research University, Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, CC 065, 34095 Montpellier, France.

^C School of Physical, Environmental and Mathematical Sciences, University of New South Wales (UNSW), Canberra ACT 2600, Australia.

^D Irstea Mediterranean Ecosystems and Risks, Route Cézanne, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France.

^E BIOGECO (Unité Mixte de Recherche 1202), Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Université de Bordeaux, 33615 Pessac, France.

^F Corresponding author. Email: s.lahaye@adfa.edu.au

Abstract

Wildfire containment is often very challenging for firefighters, especially for large and rapidly spreading fires where the risk of firefighter entrapment is high. However, the conditions leading to these 'dangerous' fires are poorly understood in Mediterranean Europe. Here, we analyse reports and interviews of firefighters over the last 40 years in four regions of south-eastern France and investigate the weather conditions that induce large fires, fast-growing fires and fires that are conducive to entrapment. We adopt a quantile regression model to test the effect of weather conditions across different fire sizes and growth rates. The results show that strong winds drive the largest fires everywhere except in Corsica, the southernmost region, where high temperature is the main driver. Strong winds also drive entrapments whereas high temperatures induce rapidly spreading fires. This emphasises that wind-driven fire is the dominant pattern of dangerous fires in France, but it reveals that large 'convective' fires can also present considerable danger. Beyond that, the Fire Weather Index appears to be a good predictor of large fires and fires conducive to entrapments. Identifying weather conditions that drive 'dangerous' wildfires will provide useful information for fire agencies to better prepare for adverse fire behaviours.

Additional keywords: entrapment, Fire Weather Index, firefighter safety, growth rate, high temperature, large fires, quantile regression, strong wind.

Introduction

Despite the large expenditure that is dedicated to forest fire suppression, many Euro-Mediterranean countries still face severe fire events (San-Miguel-Ayanz *et al.* 2013). Indeed, suppression resources have proved inadequate in controlling large fires that exhibit extreme fireline intensity, rapid propagation and spotting (Castellnou *et al.* 2010; Fernandes, Pacheco, *et al.* 2016). These characteristics make fires difficult to control and reduce the range of suppression options (Moreira *et al.* 2011).

Destructive fire seasons have generally led to enhanced suppression-focused policies (Mateus and Fernandes 2014). In France, such policies have been in place since 1992 (Battesti 1997; Curt and Frejaville 2017). They are based on improved prediction of daily fire danger, increased communication about fire risk, and banning the use of forests during high-risk days. Above all, the centrepiece is a hard-hitting, fast response to all ignitions, concentrating all the fire suppression means available (Battesti 1997). This strategy has resulted in a large decrease in fire activity, especially in terms of the total annual area burned (Turco *et al.* 2016) despite the increasing fire risk with recent climate change (Frejaville and Curt 2017). However, such a strategy has also produced unwanted issues (Collins 2012), one of which may be increased risk exposure of fire crews because of massive commitment of resources.

This is why integrative decision-support tools are being developed to help management decision-making (Pacheco *et al.* 2015). These tools are generally empirical models that need to be built and calibrated with regard to the local conditions before they can be expected to produce reliable results (Sullivan 2009; Gibos *et al.* 2014). Among the conditions, fire weather has a significant effect on large fires (Fernandes, Pacheco, *et al.* 2016; Jolly and Freeborn 2017); therefore, the role of fire weather in dangerous fires needs to be properly understood.

In France, the national meteorological agency (Meteo France) uses an indicator based on the Fire Weather Index (FWI) to forecast the daily ignition risk and the average rate of spread across 119 areas with an average size of 668 km² (Meteo France, Ordre de service feu de forêt 2016, unpubl. data). However, this forecast does not inform on the likelihood of any extreme fire behaviour as defined by Werth *et al.* (2016). Neither does it consider the geographical heterogeneity of firefighting response (e.g. amount of resources, operational delays) nor the heterogeneity of difficult terrain and consequently the possibility for firefighting crews to be entrapped.

The regional fire regime depends on topography, fuel, climate and anthropogenic factors (Curt *et al.* 2016). In the present study, we focused on the south-east of France, which consists of several pyroregions, i.e. homogeneous regions in terms of both fire regime and climatic conditions (Frejaville and Curt 2015). For each of these pyroregions, the aim was to assess the fire weather drivers leading to the most erratic and dangerous fires. We studied a database of 808 fires and looked for the drivers of: the largest fires; the fires with the highest rates of growth; and finally, the ones associated with firefighter entrapments. This work represents a pioneering effort to better understand the drivers of the most dangerous fires in this part of the world, and to improve the safety of emergency responders.

Materials and methods

Fire database

The study area extends over a 74 000-km² region in the south of France. The region experiences a Mediterranean climate that is conducive to high fire activity in summer (Curt *et al.* 2016). A total of 1369 fires >10 ha were reported from 2001 to 2016 in the Promethee database, which has recorded fires in the area since 1973 (<http://www.promethee.com/>, accessed 19 Jan 2018). We investigated 724 of these fires recorded in an unpublished database by Meteo France. To increase the dataset of dangerous fires, we also investigated 84 fires for the period 1979 to 2000. However, only fires that were larger than 200 ha or resulted in cases of entrapment were included (Table 1). We chose this threshold because fires larger than 200 ha, i.e. 0.7% of fires in France (<http://www.promethee.com/>, accessed 19 Jan 2018), severely challenge fire crews (Perriez *et al.* 2003; Lahaye *et al.* 2014).

There is no official record on fire behaviour or on firefighter entrapments, so we collected this information across the territory from the following sources:

- (i) 87 reports from fire agencies and the national ‘Direction de la Sécurité Civile’, who have conducted investigations on the most serious accidents and the largest fires in recent years,
- (ii) 38 face-to-face interviews with fire officers and forest technicians who responded to fires larger than 200 ha and who directly observed the fireline. The aim was to get information on the fire propagation through time.

In total, the database comprises 808 fires from 1979 to 2016.

Table 1. Investigated fires with respect to period and size

% of Promethee indicates the proportion of fires investigated in this study in relation to the total of same size-class fires in the Promethee database in the same period

Period	Size	Number of fires	% of Promethee	Source
1979–2000	<200 ha	8 ^A	0.2%	Reports
	≥200 ha	76	17%	Reports
2001–2016	<200 ha	611	49%	Meteo France, reports and interviews
	≥200 ha	113	86%	Meteo France, reports and interviews

^A Fires investigated because of entrapment.

Danger descriptors

Table 2 provides a description of the variables used in this study. In addition to the final size of the fire (SURF, ha), we retrieved the growth rate of the burnt area (RA, ha h⁻¹) for 153 fires larger than 200 ha. RA describes the overall increase in fire area with time and not only its forward rate of spread. This information was inferred from responder interviews and post-fire reports by constructing isochrones of fire propagation. As it is difficult to know the precise time of ignition, the calculation began from the time at which the fire had grown to 10% of its final size. Similarly, as the final stages of a fire typically involve days of mop-up operations (Pacheco *et al.* 2014), which are beyond the scope of the present study, we stopped RA calculation when the fire had grown to 90% of its final extent. Rapidly growing fires were interpreted as dangerous because they spread more quickly than firefighting resources could effectively respond to.

Finally, we investigated fires associated with firefighter entrapments (TRAP) to compare them with fires for which no dangerous situation was reported (SAFE). In designating a TRAP fire, we only considered fires that suddenly and surprisingly threatened crews, ignoring other health issues such as heart attack, car accident and smoke or heat exhaustion. Although the consequences of TRAP varied in their seriousness (e.g. destruction of vehicles, injuries or fatalities), we did not establish any hierarchy of events.

Table 2. Variables used in the analysis

Variable	Description	Range	Interquartile range	Source
Danger descriptors				
SURF (ha)	Final size	10–14 020	16–165	Promethee
RA (ha h ⁻¹)	Growth rate. Retrieved for 153 fires >200 ha	1–1359	58–191	Reports and interviews
TRAP	Entrapment	0–1		Reports and interviews
Weather				
FWI	Fire Weather Index	1–196	39–70	Meteo France, reference station at 1200 UTC
FFMC	Fine Fuel Moisture Code	62–99	90–94	Meteo France, reference station at 1200 UTC
DMC	Duff Moisture Code	14–879	90–181	Meteo France, reference station at 1200 UTC
DC	Drought Code	24–1108	479–755	Meteo France, reference station at 1200 UTC
TEMP (°C)	Temperature	6–43	24–30	Meteo France, closest station of fire at ignition time
RH (%)	Relative humidity	6–94	26–44	Meteo France, closest station of fire at ignition time
WIND (km h ⁻¹)	Wind speed at 10 m height	0–90	15–31	Meteo France, closest station of fire at ignition time

Weather data

It is necessary to assess fire weather to understand fire behaviour (Pyne *et al.* 1996), and the FWI is designed for that aim. The FWI is an integrative and unitless index that was originally designed to forecast fire risk in Canada on the basis of daily weather conditions (Van Wagner 1987). The FWI consists of sub-indices integrating surface weather data and rainfall over the previous 24 h. The FWI and its sub-indices provide a uniform, numeric method of fire danger rating throughout an area; they have been extensively used in the European Mediterranean basin

regions (Giannakopoulos *et al.* 2012). The data considered herein are provided by the reference weather station from the fire area at 1200 local time daily. Each year, Meteo France refines the division of 119 areas and the location of a reference station per area (Meteo France, unpubl. data) so station observations are assumed to be representative of the fire weather within the area. In addition to the final FWI code, the fine fuel moisture code (FFMC), the duff moisture code (DMC) and the drought code (DC) were collected (de Groot 1987). FFMC quantifies the moisture content of surface layers and thin fuel, i.e. herbaceous matter and very small twigs. DMC is representative of the average moisture content of loosely compacted and moderately deep organic layers, as well as of fuel availability of medium-size woody material such as shrubs. DC is representative of the average moisture content of deep, compact, organic layers as well as of the seasonal drought effects on forest fuels. We also considered air temperature (TEMP, °C), relative humidity (RH, %) and 10-m-height wind speed, (WIND, km h⁻¹) at the closest station to the fire ignition point. There are 274 automatic weather stations in the area, so that the mean area covered is 270 km² (Meteo France, Ordre de service feu de forêt 2016, unpubl. data).

Pyroregions

Frejaville and Curt (2015) defined 10 pyroregions in southern France corresponding to different spatiotemporal fire regimes. Using *ArcGIS 10.1* software (Environmental Systems Research Institute, <https://www.arcgis.com/>, accessed 15 Feb 2017), we aggregated them into four homogeneous pyroregions based on their topography and ecosystem (Fig. 5): P1–P4.

(i) P1 corresponds exclusively to Corsica, an 8800-km² mountainous island, which extends south of 43°N. The maquis, a granitic soil shrubland, is the predominant vegetation type;

(ii) P2, called Provence, is the most urbanised with 3 million inhabitants on 8700 km². The topography comprises hills and low-elevation mountains (maximum of 1100 m) less than 100 km from the sea. Conifers, broadleaved forests and shrublands form the largest part of the fuel (Curt *et al.* 2013);

(iii) P3 comprises the large valleys of the Rhône and Aude rivers as well as the coastal Languedoc and Roussillon lowlands. The size is 22 300 km² and the vegetation is a patchy mosaic of forests and agricultural lands;

(iv) P4 covers 33 800 km² of inner lands: the eastern part of the Pyrenees Mountains, Southern Central Massif and southern Alps. The terrain is rugged and the vegetation comprises mountain forests and shrublands.

Analysis

We looked at the repartition of the 808 fires across the four pyroregions, and tested, for each region, the TRAP mean conformity with a parametric Student test. We used quantile regression to model the weather predictors of SURF in each pyroregion. This method is effective in investigating the effect of weather conditions on different fire sizes, in particular for the largest fires (Fernandes, Barros, *et al.* 2016). The same quantile regression method was used to investigate the weather predictors of RA. The analyses were performed in *R 3.3.1* (<https://www.r-project.org/>, accessed 22 Feb 2017) using the *QuantReg* package (<https://cran.r-project.org/package=quantreg>, accessed 22 Feb 2017). Finally, we compared weather conditions between TRAP and SAFE fires using Student *t*-tests.

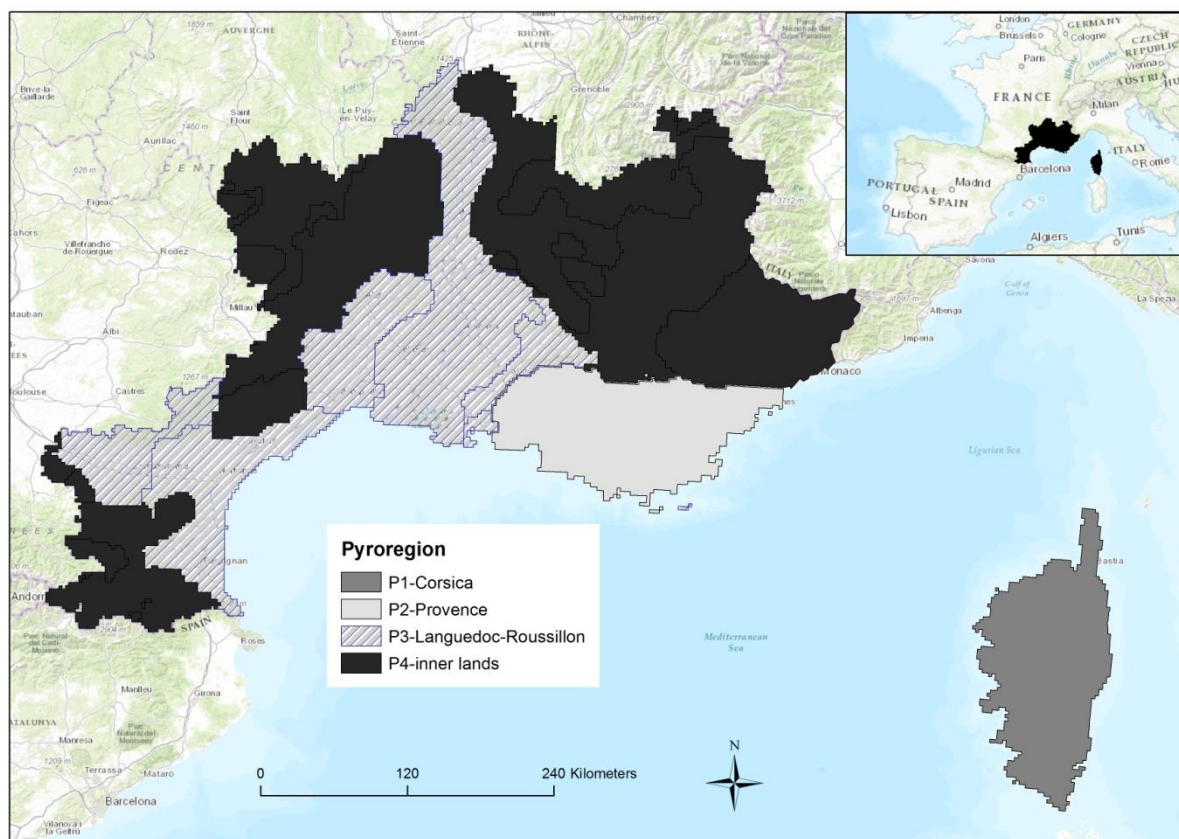


Figure 5. Location of the four homogeneous pyroregions in southern France, from Fréjaville and Curt (2015).

Results

Fire location

Table 3 shows the repartition of the 808 fires (including 55 entrapments) between the four pyroregions. As displayed in Fig. 6, in all pyroregions, the number of fires decreases exponentially as the fire size increases. The largest fires are in P2, then in P1. The 55 entrapments represent 6.8% of the fires investigated. Their proportion is significantly higher in P2 ($P = 1.1 \times 10^{-4}$) and lower in P1 ($P = 2.1 \times 10^{-2}$) and P4 ($P = 5.4 \times 10^{-5}$).

Table 3. Distribution of investigated fires, entrapments and large-size predictors across pyroregions

DMC, duff moisture code; DC, drought code; RH, relative humidity

Pyroregion	Number of fires	Number of fires >200 ha	Number of entrapments	Predictors of largest fires
P1	212	59	7	TEMP
P2	181	78	34	WIND, DC
P3	228	31	11	WIND, FWI, DC, DMC
P4	187	20	3	FWI, WIND, RH

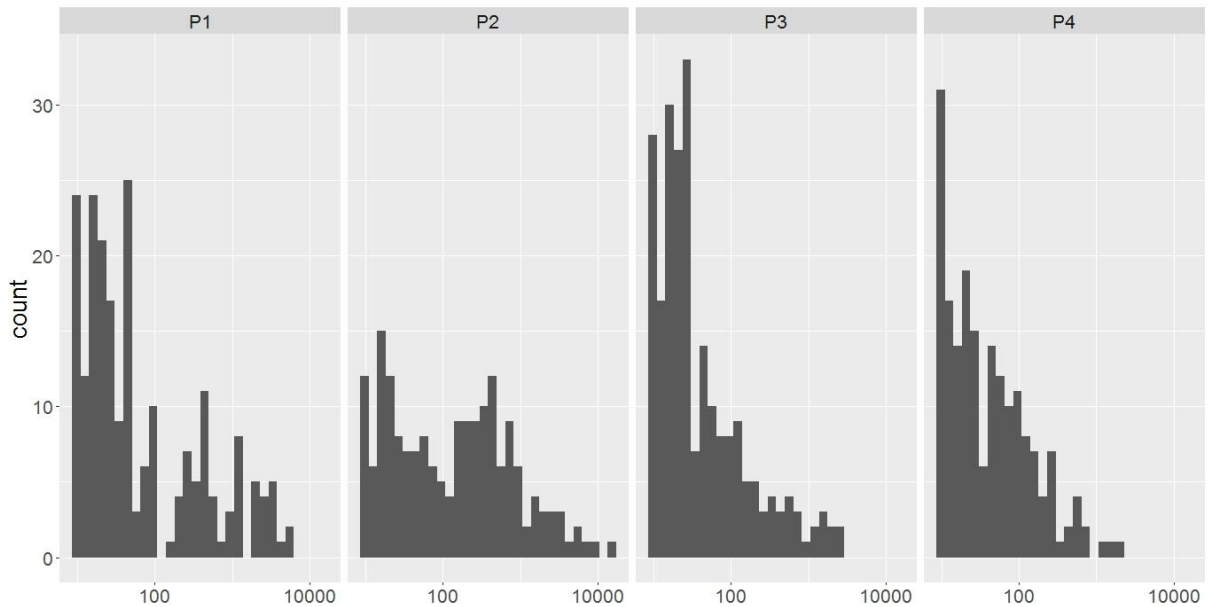


Figure 6. For pyroregions P1–P4, number of fires according to their size in logarithmic scale.

Predictors of size

The predictors of fire size vary across the four pyroregions (Table 3 and Fig. 7). In P1, FWI and WIND are significant predictors of small fires (10th and 30th quantiles), whereas TEMP drives larger fires (70th and 90th quantiles). In P2, WIND is the dominant driver of fire size, except for the smallest (10th quantile) fires. DC is also a significant predictor of the largest (90th quantile) fires in P2. In P3, apart from the smallest fires, fire size is explained by both WIND and DC. The steeper regression slopes for 90th quantile fires mean that the response to WIND and DC is stronger for the largest fires. FWI and DMC also have a strong effect on the largest fires in P3. In P4, FFMC predicts the smallest fires, whereas the size of other size classes responds positively to FWI and negatively to RH. The size of 90th quantile fires also responds positively to WIND.

Predictors of growth rate (RA)

The 153 fires larger than 200 ha that were investigated for RA were underrepresented in P3 and P4; as a consequence, the results are displayed globally, not by pyroregion. It is worth noting that the time used to infer RA, corresponding to 10–90% extent of fire, ranged from 1 to 120 h, with a median of 4.75 h and an interquartile range of 3–9 h. Except for FFMC and DMC, all the weather variables influence some of the quantiles of RA (Table 4). TEMP is a common driver to all RA apart from the slowest-growing fires (10th quantile), which are influenced by WIND, FWI and DC. DC does not contribute to any other quantile of RA. RH and FWI influence the middle quantile growth rates: RA decreases significantly with RH for the 30th and 50th quantiles, whereas RA increases significantly with FWI for the 10th, 50th and 70th quantiles.

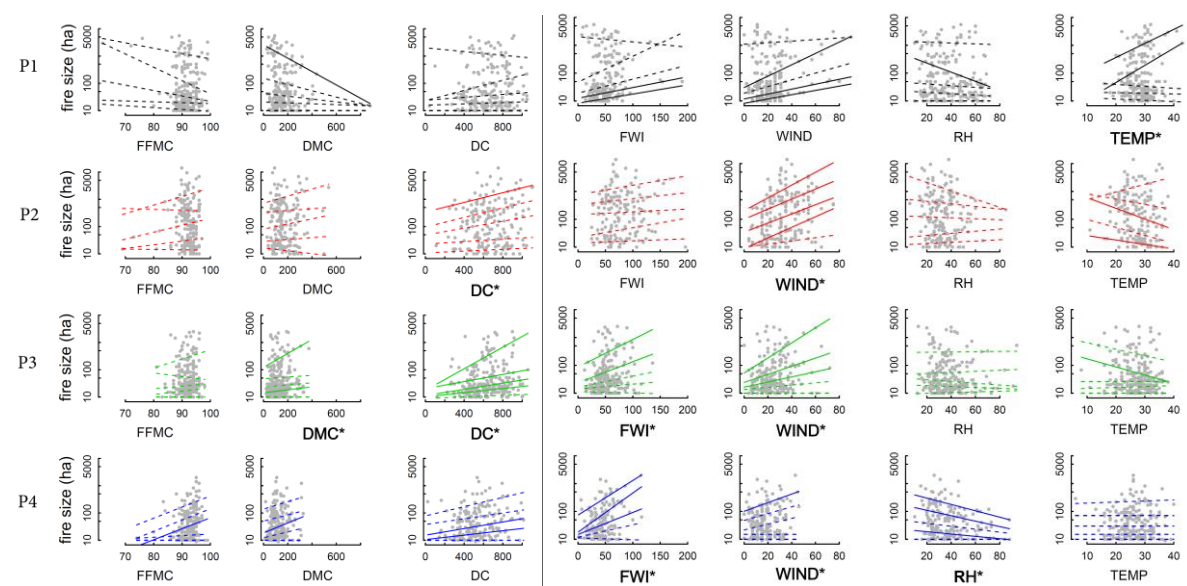


Figure 7. For pyroregions P1–P4, influence of fine fuel moisture code (FFMC), duff moisture code (DMC), drought code (DC), Fire Weather Index (FWI), WIND, relative humidity (RH) and temperature (TEMP) on the size of fires (see Table 2 for variables description). In each chart, from bottom to top, the five lines represent quantile regressions (10th, 30th, 50th, 70th and 90th quantile respectively) of the fire size, so the lowest line represents the smallest fires and the highest line represents the largest fires. A solid line indicates significant regression ($P < 0.05$) and a dashed line non-significant regression ($P > 0.05$). Asterisks mark meaningful variables for the 90th quantile.

Table 4. Predictors of growth rate and entrapment
DMC, duff moisture code; DC, drought code; RH, relative humidity

Danger descriptor	Quantile value (ha h ⁻¹)	Meaningful predictors
10th quantile of RA	28	WIND, FWI, DC
30th quantile of RA	67	RH, TEMP
50th quantile of RA	100	RH, TEMP, FWI
70th quantile of RA	165	WIND, FWI, TEMP
90th quantile of RA	351	TEMP
Entrapment		WIND, FWI

Predictors of entrapment fires (Fig. 8)

The mean fire size of TRAP, 1015 ha, is significantly larger than the mean fire size of SAFE, 249 ha ($P = 4.5 \times 10^{-4}$). Among the predictors, FWI and WIND result in significant differences between TRAP and SAFE fires. The mean FWI of TRAP, 70, is significantly higher than the mean FWI of SAFE, 56 ($P = 1.8 \times 10^{-3}$). Mean WIND is stronger for TRAP, 35 km h⁻¹, than for SAFE, 23 km h⁻¹ ($P = 1.8 \times 10^{-6}$). Investigating sub-indices of FWI revealed that there are no significant differences in DC and DMC between TRAP and SAFE ($P > 0.05$), and a slight difference in the mean FFMC, lower for TRAP, 90, than for SAFE, 92 ($P = 0.03$). Similarly, no differences in TEMP and RH were found between TRAP and SAFE ($P > 0.05$).

Discussion

Fire size

The fire database considered in the present study is representative of fire distribution in the French Mediterranean region: there is a power-law decrease in the number of events as size increases (<http://www.promethee.com/>). Most of the fires are captured over a short and recent period (2001–16), so the analysis is not suited to infer changes in trend over time. Despite considerable deployment of resources (Curt and Frejaville 2017), P2-Provence records the largest fires because of a challenging combination of fuel, weather and anthropogenic pressure (Curt *et al.* 2016). P1-Corsica is the region second-most impacted by large fires. In this region, TEMP drives the size of the largest fires, although this is not the case in the other regions. Noting that the latitude of P1 is lower than the latitude of the other regions, our findings are consistent with the results of another study (Cardil *et al.* 2014) that pointed out the dominant effect of heat waves on fires in the southernmost parts of Mediterranean Europe. However, as highlighted by Ruffault *et al.* (2016), the primary driver of fires over mainland France is wind. Beyond the established trend that strong windy days lead to high fire danger, our results indicate a correlation between wind speed and large fire size everywhere except in P1.

Meteo France is currently adjusting the method for evaluating fuel sensitivity to fire risk, giving more weight to high values of DC (F. Vaysse, pers. comm.). We show here that DC is also a significant predictor of large fire size in P2 and P3-Languedoc–Roussillon. Several studies have emphasised that FWI is a good predictor of extremely large fires in Portugal (Fernandes, Barros, *et al.* 2016; Fernandes, Pacheco, *et al.* 2016). Having demonstrated that FWI is a predictor of large fire size over P3 and P4-inner lands, we support the use of this index to evaluate not only the ignition likelihood but also the potential for fire growth in France.

Rate of growth

Many factors, including the effects of suppression efforts (or lack thereof), influence the final size of a fire (Fernandes, Barros, *et al.* 2016; Curt and Frejaville 2017). Nevertheless, the rate of growth is closely related to fire behaviour. In our study, the fires that grew larger than 200 ha were mainly associated with the worst conditions of drought and wind. Among them, fires with the slowest rate of growth were mainly driven by wind. A fire driven by strong winds tends to form the shape of a narrow ellipse (Fendell and Wolff 2001; Costa *et al.* 2011), so that even if the forward rate of spread is high, the lateral expansion remains limited, and subsequently limits the areal growth. These wind-driven fires are the most common among large fires in France (Ruffault *et al.* 2016). However, we found that the fastest-growing large fires relate to another, even more dangerous pattern of fire propagation, which cannot be explained by narrow, elliptical, wind-driven fires. To grow so fast, they need to exhibit significant lateral development in addition to the forward spread in the direction of the wind (Sharples *et al.* 2012). The main driver we found, temperature, is consistent with a convectively driven fire type. Such fires have also been referred to as ‘plume-driven’ fires (Werth *et al.* 2016).

For fires that are not definitively wind-driven or convectively driven, there is a scale of situations where drought, wind direction and speed, RH, temperature, terrain and fuel interact to drive fire growth. For these cases, it would be necessary to consider the hourly evolution of weather parameters to reconstruct the fire behaviour and extension. The methods employed in this study considered unique weather values for each fire, and so were not able to address the finer details of fire development. This highlights the need for fire behaviour analysts to predict the evolution of fires on an hourly basis in operational contexts (Gibos *et al.* 2014).

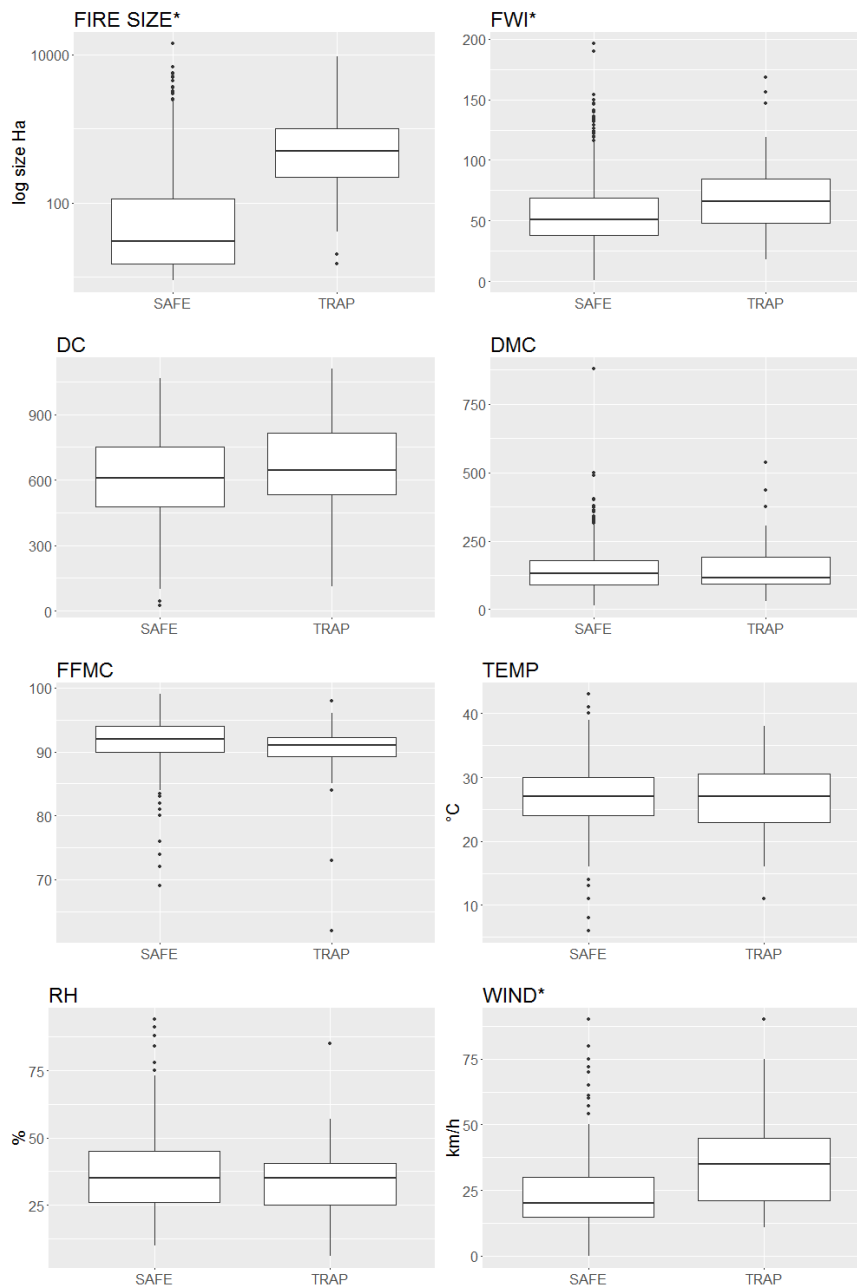


Figure 8. Comparison of the fire size and the weather variables (see Table 2 for variables description) for fires with entrapment (TRAP) and without entrapment (SAFE). Asterisks mark meaningful variables

Entrapments

Most entrapments happen during large fires. Although several studies emphasised the effectiveness of massive attack in suppressing many fires (Turco *et al.* 2016; Curt and Frejaville 2017), this policy has also reached its limits in the most adverse weather situations inducing the largest fires (Fernandes, Pacheco, *et al.* 2016; Curt and Frejaville 2017). We state here that, in these highly fire-prone situations, fire services are not only likely to be overwhelmed but they are also placed under high risk of accident. It must be noted that we considered entrapments from 1979 to 2016, i.e. before and after the establishment of the current massive attack strategy, and that the evolution through time was not analysed.

The lower FFMC we found for fires with entrapment is difficult to rationalise. In a Mediterranean context, with strong wind and drought, the FFMC value remains very high over long periods in summer (Curt *et al.* 2013) so that this indicator may not adequately discriminate between different fire situations, in contrast to FWI or DC.

There is a correlation between entrapments and fires with strong wind but not between entrapments and fires with high temperature or between entrapments and fires with low RH as reported elsewhere (Diakakis *et al.* 2016). This suggests that the pattern of accidents is not the same in France as it is in other European countries where the entrapment risk increases under hot and dry air masses (Cardil *et al.* 2014; Cardil and Molina 2015). Regarding fuel availability, whether it is considered for deep or moderately deep layers (DC and DMC respectively), drought alone does not increase the likelihood of entrapment. However, the likelihood of entrapment increases with severe daily fire weather conditions (FWI), particularly when there are strong winds. Our results are consistent with studies in the USA (Jolly and Freeborn 2017) and in Australia (Lahaye, Sharples, *et al.* 2018), which suggested that fire danger indexes often inform of dangerous fire behaviours.

P2 is the region where fire services face the most danger: large fires and many entrapments. The lower risk in P4 is consistent with lower fire potential due to less adverse weather and fewer anthropic ignitions (Curt *et al.* 2016). However, the likelihood of entrapment is also lower in P1, despite the fact that it suffers large fires induced by adverse weather, fire-prone fuels and human pressure. As suggested by Lahaye *et al.* (2014), the large number of resources allocated to fires in P2, compared with P1, may explain the increased likelihood of entrapment, as exposure to the risk is increased.

Limitations

The method we used to calculate average rate of fire growth does not reflect the possible variability in conditions driving fire development. As such, some of the long-lasting fires designated in this study as slowly growing may have sporadically developed rapid growth rates over shorter periods of time. Moreover, they may have also been influenced by variable wind, temperature and humidity conditions resulting from diurnal variability, for example. However, most of the investigated fires grew over periods of less than 9 h, so we can assume that the weather values are representative. It is worth noting that Fernandes, Barros, *et al.* (2016) investigated fires in Portugal from their ignition to containment time and therefore had longer duration fires than those considered here, which were defined by their 10–90% extent.

It is also likely that we failed to consider all the entrapments because, unlike the Wildland Fire Lessons Learned Center in the United States (<https://www.wildfirelessons.net>, accessed 10 June 2017), fire agencies do not routinely collect information of accidents in France. A formal process to record such information would assist in future studies of these significant safety incidents. However, thanks to the contacts we established with the fire agencies, we accessed most of the existing reports. The data provided in these reports and in interviews are not always precise and fully reliable, but we did not consider information that was poorly supported.

The present study focused only on the contribution of fire weather, and did not consider the contribution of topographic factors. Although the influence of topography on firefighter entrapments has been investigated in other recent studies (Page and Butler 2017; Lahaye, Sharples, *et al.* 2018), the influence of topography on the development of large fires, and on

fires that exhibit rapid growth, remains to be examined and would make for an interesting extension of the present analyses.

Furthermore, although a dense network of stations provided weather data, we only captured the synoptic situation and not the finer-scale influences. Notably, lack of reliable data prevented us from exploring the contribution of changes in wind direction, which is known to be a critical driver of firefighter entrapment in Australia (Cheney *et al.* 2001; Lahaye, Sharples, *et al.* 2018). In Australia, adverse fire weather conditions are often associated with pre-frontal conditions and the arrival of a distinct wind change at some point in the fire's lifetime. In France, however, the synoptic conditions that lead to adverse fire weather (Ruffault *et al.* 2016) are not generally conducive to abrupt changes in wind direction. Although it is likely that local changes in wind speed and direction, driven by wind–terrain interactions, play an important role in entrapments in France, the data network used in the present study is not able to resolve the influence of such effects. More sophisticated methods of investigation (e.g. detailed numerical weather prediction models) are required to address this critical issue.

Having highlighted the role of weather parameters in dangerous fires, further research is now required to determine how weather, terrain and fuel combine to produce extreme and dangerous fire behaviours. The final issue is to better inform fire managers and potentially improve firefighter safety.

Conclusion

We investigated the weather conditions inducing the most dangerous fires in four pyroregions of France. P2-Provence recorded both the largest fires and the most numerous entrapments whereas P1-Corsica was also affected by large fires but fewer entrapments. Strong winds are the main driver of the largest fires in all the pyroregions except for P1; it is the main driver of entrapments too. Beside this prevalence of dangerous wind-driven fires, fires driven by high temperatures appear to be the ones growing the fastest; they are also the largest in P1. Overall, our analyses support the use of the FWI as a useful tool to determine the risk of dangerous fires. The present study emphasises the most adverse weather conditions that firefighters need to pay special attention to. Our work will also guide further research into the modes of fire behaviour resulting in entrapment.

Acknowledgements

This study was funded by the Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches-du-Rhône. It would not have been possible without the valuable contributions of firefighters and foresters from French Departments (Alpes de Haute-Provence, Alpes-Maritimes, Ardèche, Aude, Bouches-du-Rhône, Corse, Var, Gard, Hérault, Pyrénées-Orientales and Var). The forest fire team of Meteo France supplied invaluable data. We also thank Rachel Badlan (UNSW Canberra) and the anonymous reviewers, whose comments led to improvements in the paper.

Chapitre II: contribution de la météorologie et de la topographie dans les accidents de pompiers en Australie

Ce chapitre a été publié avec la référence suivante:

Lahaye, S, Sharples, J, Matthews, S, Heemstra, S, Price, O, Badlan, R. (2018) How do weather and terrain contribute to firefighter entrapments in Australia? *International Journal of Wildland Fire* **27**, 85–98. <https://doi.org/10.1071/WF17114>

Il est reproduit en l'état. Cependant, les tables et figures sont réindexées pour le mémoire de thèse, les références bibliographiques sont reportées en fin de mémoire et les annexes, appelées Appendix 2 et Appendix 3 dans le texte, apparaissent à la fin du mémoire comme Annexe 2 et Annexe 3.

Résumé

Alors que les accidents de pompiers piégés par le feu en Australie seraient majoritairement liés à des conditions météorologiques défavorables, les publications et consignes opérationnelles laissent penser que le relief pourrait également jouer un rôle. Cependant, il n'existe aucune base de données complète des accidents en Australie, si bien que l'influence respective des facteurs météorologiques et topographiques dans ces accidents n'est pas déterminée.

J'ai examiné pour l'article reproduit dans ce chapitre des comptes rendus d'enquêtes légales (instructions du *Coroner*) et des rapports internes aux services incendie de plusieurs états australiens entre 1980 et 2017. 45 accidents suffisamment documentés ont pu être extraits de ces rapports et étudiés en détails.

La première analyse révèle que la plupart des accidents se produisent lors des plus grands incendies et que le nombre de décès a diminué au cours de la période étudiée. Nous avons ensuite comparé les conditions météorologiques et topographiques associées aux 45 accidents avec les conditions associées à 45 incendies, comparables en surface, sans accident. Un modèle de régression linéaire a permis d'identifier les principaux facteurs associés aux accidents. 42% des accidents étudiés se sont produits après un changement brutal de direction du vent, ce qui fait de ce facteur le principal risque d'accident en Australie. Cependant, en présence de vent

fort dans un relief accidenté, la probabilité d'accident est également augmentée, ce qui laisse penser que des comportements du feu dynamiques pourraient donner lieu à des accidents.

Alors qu'il est nécessaire d'étudier plus en détails la relation entre ces comportements du feu dynamiques et les accidents, la compréhension du rôle joué par la météorologie et le relief est un premier pas pour adapter les règles de sécurité à l'intention des pompiers australiens.

How do weather and terrain contribute to firefighter entrapments in Australia?

Sebastien Lahaye^{A,D}, Jason Sharples^A, Stuart Matthews^B, Simon Heemstra^B, Owen Price^C and Rachel Badlan^A

^A School of Physical, Environmental and Mathematical Sciences, University of New South Wales Canberra, ACT 2600, Australia.

^B New South Wales Rural Fire Service, 15 Carter Stree, Lidcombe, NSW 2141, Australia.

^C Centre for Environmental Risk Management of Bushfires, University of Wollongong, NSW 2522, Australia.

^D Corresponding author. Email: s.lahaye@adfa.edu.au

Abstract

Adverse weather conditions and topographic influences are suspected to be responsible for most entrapments of firefighters in Australia. A lack of temporally and spatially coherent set of data however, hinders a clear understanding of the contribution of each weather type or terrain driver on these events. We investigate coronial inquiries and internal fire agencies reports across several Australian states from 1980 to 2017 and retrieve 45 entrapments. A first analysis reveals that most entrapments happen during large fires and that the number of deaths has decreased over the last few decades. Comparing the meteorological and topographical conditions of the entrapments with the conditions of a reference set of fires without entrapment, we build a linear regression model that identifies the main contributors to firefighter entrapment. A change in wind direction, which was associated with 42% of the incidents examined, is the main factor contributing to entrapments. Interaction between strong winds and steep slopes also influences the likelihood of entrapment and suggests that dynamic fire behaviours may also play important roles. As further details of this relationship between dynamic fire propagation and firefighter entrapment is now required, the understanding of weather and terrain contribution is a first step to produce comprehensive safety guidance.

TOC summary. Firefighters are occasionally entrapped by wildfires. This paper presents an analysis of incidents in Australia over the last 40 years, and reveals the main contributing factors to those entrapments. The effect of a wind change on fire spread direction was found to be the principal cause of fatal fire entrapments.

Additional keywords: dynamic fire behaviour, firefighter safety, ruggedness, wind direction change.

Introduction

Southern Australia is prone to adverse weather conditions and drought, which can induce very large and destructive fires. During such events, one of the roles of the firefighters is to contain the spread of fire in order to protect endangered population and assets. However, along with this obligation, fire agencies also face the necessity of ensuring the safety of their firefighters. As highlighted by Alexander *et al.* (2017), many firefighters have been injured or killed while fighting forest fires globally. From 1910 to 2006, 900 perished in the United States, including 411 from entrapment, i.e. directly caught by the fire heat or smoke (Mangan 2007). Alexander and Buxton-Carr (2011) reported 165 fire responder deaths in Canada from 1941 to 2010. In Europe, 521 fatalities, both civilians and firefighters, were non-exhaustively counted between 1980 and 2007 (Viegas *et al.* 2009), whereas in Australia, 733 civilians and 92 firefighters died during bushfires between 1901 and 2011 (Blanchi *et al.* 2014).

After Wilson (1977), who proposed common denominators of fatal and near-fatal fires, Lahaye *et al.* (2016) stated that some entrapments have occurred when traditional understanding of fire behaviour suggested low-risk conditions. This emphasises the necessity to more thoroughly address the role of fire behaviour regarding firefighter safety. Several studies have investigated the environment and conditions leading to entrapments (Blanchi *et al.* 2012; Diakakis *et al.* 2016; Page and Butler 2017), whereas others focussed on fire behaviour and human factors using case studies (Butler *et al.* 1998; Viegas *et al.* 2009). Although Page and Butler (2017) pointed out the role of topographic slope in fatalities in the United States, their model failed to capture the significance of wind. Conversely, Lahaye *et al.* (2016) found wind speed was the most significant driver of entrapments in France. No such studies have been conducted in Australia but Cheney *et al.* (2001) reviewed some real cases and defined the concept of the 'Dead-Man Zone'. This concept has been widely disseminated in bushfire fighting training materials. Butler (2014) specified safety distances to maintain between fire and firefighters in terms of flame height, whereas other studies provided tools to keep firefighters clear from risks by modelling trigger points to escape routes (Fryer *et al.* 2013), or emphasising the significance of anchor points (Alexander and Thorburn 2015).

Sudden change in wind direction is a challenging factor in a topographic landscape like that found in Australia (Luke and McArthur 1978; Grose *et al.* 2014) and it has been suggested that it has been responsible for most of the entrapments that have occurred (Cheney *et al.* 2001). However, recent studies have pointed out terrain and weather arrangements likely to cause extreme fire behaviour (Werth *et al.* 2016). Steep slopes result in flame attachment and fire eruption (Van Wagner 1977; Viegas and Simeoni 2011; Edgar *et al.* 2016); vorticity-driven lateral fire spread (VLS) occurs on leeward slopes and is associated with certain wind conditions and the slope of the terrain (Simpson *et al.* 2016). Moreover, mass spotting, which is likely to develop in eucalyptus forests with dry and windy weather, can be another significant element of fire propagation (McArthur 1967). All of these abrupt changes in fire behaviour characteristics involve intensive energy release and transition to deep or widespread flaming (Sharples *et al.* 2016), and so may contribute to entrapments.

Appropriate safety guidance for firefighters must consider all the different 'Watch Out Situations' (New South Wales Rural Fire Service 2010; National Wildfire Coordinating Group 2014). This requires a good knowledge of the environmental factors likely to lead to entrapment. In the present study, we examine the effect of wind direction changes and other weather and terrain factors in firefighter entrapments in Australia over the last 40 years. For

this purpose, we compared the conditions during a set of entrapments with those from a control set of fires without entrapment.

Method

Firefighter entrapments

Entrapment fires are taken to be those that suddenly and surprisingly present a direct threat to fire crews. This is similar to the approach taken by Lahaye *et al.* (2017), who ignored other health issues such as heart attack, car accident or smoke exhaustion. Although comprehensive records of such incidents are kept in the United States (Page and Butler 2017), there is no official database of accidents that have occurred during wildfires in Australia. However, the most serious accidents in recent years have been the subject of investigative reports or other communications and entrapments resulting in fatalities have led to coronial inquests (New South Wales Government 2009). We extracted data from five coronial reports that documented incidents in several states: New South Wales (Coroners Court of Wollongong 1981; Wilson 1983; Stevenson 2001), South Australia (Schapel 2007) and Victoria (State Coroner's Office 2001). Ferguson (2016) and the Leading Emergency Services (2012) documented two cases in Western Australia and McLeod *et al.* (2010) provided information on the 2009 fires in Victoria. We also considered internal fire agency reports and publications as described below and detailed in Appendix 2. Because the study required data that include precise times and locations of the entrapments, and because this was generally missing for old cases, we focussed on the 1980–2017 period. Testimonies and on-site investigations helped to accurately locate some of the entrapments.

The New South Wales Rural Fire Service (NSW RFS) provided several sources of information (<http://nswrfs.intersearch.com.au>, accessed 30 June 2017). From 2000 to 2007, there were four editions of a *Firefighter Safety Digest* with documented analysis of fire burnovers. Some information was extracted from these sources. However, their use was limited by the lack of precision on date and location, omitted by the authors deliberately, in order to protect confidentiality. We also accessed internal investigations of the NSW RFS. Twelve of these were in the scope of our study and sufficiently well documented to be integrated into the database. We did not consider five cases where trucks became bogged in mud and were subsequently destroyed by fire. The *Bushfire Bulletin* (Bush Fire Council of NSW and NSW Rural Fire Service 1978), published since 1952, gave accounts that were too vague and lacking the detail needed for this study.

The Country Fire Authority (CFA) of Victoria, as part of its performance improvement process, reviewed 34 truck entrapments, burnovers or near misses from 2009 to 2015 (CFA 2016). The final report's scope was to assess four critical factors: people, equipment, information and management, but not fire behaviour. However, the individual investigation reports provided the data we needed for location and time. For the purpose of our study, CFA released these investigation reports and others produced in 2016. When the total area of the fire was not provided in the report we referred to the GIS layer of fires for Victoria (The State of Victoria Department of Environment Land Water & Planning 2017). Seven of the entrapments occurred on 7 February 2009 ('Black Saturday') in the Kilmore East Fire. We used the information provided by Cruz *et al.* (2012) to determine the position of the fire at the times of entrapment.

In their database of bushfire deaths, Blanchi *et al.* (2012) documented 92 firefighters fatalities in 51 different fires between 1901 and 2011. After removal of non-entrapment and imprecisely

located cases, we identified four fatal incidents in addition to those we already collected from the other sources. Three of them happened on 16 February 1983 (‘Ash Wednesday’). The National Library of Australia supplied relevant documentation that was then used to retrieve precise information for these cases (Herald and Weekly Times 1983; The Age and The Advertiser 1983; Baxter 1984; O’Connor and O’Connor 1993; Collins 2006). Two reports, published by the CFA, provided the most precise indications about the fatal entrapment of 12 firefighters in Beaconsfield (CFA 1983; Milligan 1992).

For each entrapment, we determined the number of deaths, the number of injured firefighters and the number of destroyed vehicles (Table 5). We also recorded the final size of the fire (S_{fin} , ha), the local time of the day (Time) and the time since ignition (Dt , h) when the entrapment occurred. We recorded the main type of vegetation (Fuel) around the entrapment location according to descriptions given in the various reports. We discriminated three different fuel types: forest, shrub and grass, according to Cruz *et al.* (2015). Many other factors relating to training (CFA 2016), ‘Watch Out Situation’ (CFA 1999) or the use of shelters (Page and Butler 2017) were out of the scope of this study and were subsequently not investigated.

Table 5. Variables used to describe entrapments

Variable	Description	Range	Interquartile range
Death	Number of deaths	0–12	0–1
Injur	Number of injured firefighters	0–11	0–3
Lost	Number of destroyed vehicles	0–2	0–1
S_{fin} (ha)	Final size of fire	$5-1.5 \times 10^6$	$1.4 \times 10^3-6.9 \times 10^4$
Time	Time of day when entrapment	1000–2100 hours	1500–1800 hours
Dt (h)	Time since ignition when entrapment	0.5–528	2.2–7.5
Fuel	Main type of vegetation at entrapment	Forest, shrub or grass	
Slope (°)	Mean slope within 200 m	2–30	5–9
Rugd (m)	Ruggedness within 1.5 km	21–500	111–246
T (°C)	Air temperature	16–45	29–40
H (%)	Relative humidity	8–50	10–24
W (km h ⁻¹)	Average 10-m open wind speed	3–70	25–45
ChgBef	Change in wind direction >45° within 1 h before entrapment	0–1	
ChgAft	Change in wind direction >45° within 6 h after entrapment	0–1	
D	Drought factor	2–10	9–10
FFDI	Forest Fire Danger Index	3–193	22–80
cHaines	Continuous Haines Index	0–15	9–12

Reference dataset

The investigation of entrapment fire (TRAP) specificities required a comparative set of incidents with similar fires but without entrapments. Therefore, we generated a reference dataset of fires without entrapment (SAFE), detailed in Appendix 3. We retrieved these fires

from historical geo-localised databases of fire (South Australia Dept of Environment Water and Natural Resources 2016; The State of Victoria Department of Environment Land Water & Planning 2017; New South Wales Rural Fire Service unpublished fire history databases) and from Department of Parks and Wildlife (2015). Each TRAP was associated with a SAFE in the same state with the same final size range and seasonal characteristics. To properly satisfy the condition of size however, we associated three SAFE in a different state than the paired TRAP. To select a SAFE fire, we first removed from the databases: (i) fires with unknown ignition date, (ii) fires in the same year as the associated TRAP, (iii) fires with reported entrapment, (iv) fires without any weather station operating within 80 km on the ignition date. We then selected the fire with the closest final size to the paired TRAP fire. To investigate the weather of SAFE we selected the date of ignition and chose the same time as the time of the paired TRAP. To investigate the terrain, we selected the middle location of SAFE, i.e. the centroid of the geo-referenced object.

Terrain

We performed terrain analysis with ArcGIS (ESRI 2012. ArcGIS Desktop: Release 10.1 Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute) and used the SRTM 1 arc-second Digital Elevation Model (DEM) (<https://www.usgs.gov/>, accessed 16 Jan. 2018) that corresponds approximately to a 30×30 -m spatial grid. We first derived the mean slope within 200 m of the entrapment site. Because terrain at a larger scale than the entrapment point itself may be an important factor, we also calculated a ruggedness variable as the range of the DEM in a 1.5-km circle around each point, as suggested by McRae (1992).

Weather

The weather of some major events was fully documented, e.g. Ash Wednesday (Australia Bureau of Meteorology 1985). For the other cases, the Bureau of Meteorology (BoM), Australia's national weather agency, provided observations of automatic weather stations (Australia Bureau of Meteorology 2017). We retrieved air temperature (T , °C), relative humidity (H , %), average 10-m open wind speed (W , km h⁻¹) and wind direction at the closest station from the fire location. Depending on the station and the year, the availability of data was every 30 min to 3 h.

We tracked changes of wind direction as possible drivers of entrapment. We only considered changes in direction over 45°, assuming that any variation below that threshold was due to the normal variability of wind as suggested by (Sharples, Gill, *et al.* 2010). We also only considered changes when associated with wind gusts over 20 km h⁻¹, assuming that the absence of gust indicated a weak and undetermined wind. We looked at the wind direction within the hour before the entrapment time to track a wind change causing the entrapment (ChgBef). Also, acknowledging the potential role of strong and gusty winds that may develop in pre-frontal air masses (Mills 2005; Grose *et al.* 2014), we considered any change within the six hours following the entrapment (ChgAft).

Forest Fire Danger Index (FFDI) is the index used to describe fire danger in Australia. McArthur (1967) developed the FFDI as a combination of weather and fine fuel availability to determine the fire danger in dry eucalyptus forest. The meteorological parameters are temperature, relative humidity and wind speed. The availability of the fuel is represented by the drought factor, ranging from 0 (unavailable) to 10 (highly available). FFDI has been shown to provide useful guidance over a large range of conditions, including severe or extreme weather

(Storey *et al.* 2016; Harris *et al.* 2017). We used the Noble *et al.* (1980) equation to attribute a FFDI using the weather data from the BoM:

$$\text{FFDI} = 2^{(-0.45 + 0.987 \ln D + 0.0338T - 0.0345H + 0.0234W)} \quad (1)$$

where D is the drought factor, T is air temperature ($^{\circ}\text{C}$), H is relative humidity (%) and W is 10-m open wind speed (km h^{-1}).

The level of stability in the lower atmosphere plays a role in the escalation of fires, with unstable atmospheric conditions more conducive to extreme fire development (Potter 2002; Mills 2005). Haines (1988) produced an index of dryness and stability, known as the ‘Haines index’. It considers both the temperature difference between two levels of the atmosphere and the difference between temperature and dew point in the lowest of these levels. The most commonly used levels for mid-elevation countries are 850 and 700 hPa. However, the Haines index is capped at 6 and this value is reached on most dry summer days in Southern Australia, irrespective of the range of extreme fire developments that can be experienced. Therefore we instead used the continuous Haines index (cHaines) introduced by Mills and McCaw (2010):

$$\text{cHaines} = \text{CA} + \text{CB} \quad (2)$$

$$\text{CA} = (T_{850} - T_{700})/2 - 2$$

$$\text{CB} = (T_{850} - \text{DP}_{850})/3 - 1$$

where T_{850} is temperature at 850 hPa, T_{700} is temperature at 700 hPa and DP_{850} is dewpoint temperature at 850 hPa.

To avoid excessive values of the index caused by very large dewpoint temperature depressions, Mills and McCaw (2010) applied limitations to CB. If $\text{CB} > 9$, then $\text{CB} = 9$; If $\text{CB} > 5$, then $\text{CB} = 5 + (\text{CB} - 5)/2$.

There are two ways to retrieve atmospheric temperatures, the first of which is to access sounding observations. Across the world, weather services launch radiosonde balloons twice daily at 0000 and 1200 hours UTC. These data are limited by the spacing between soundings, e.g. there are only five launching stations in New South Wales (i.e. 162 000 km^2 per station).

The second way is to access weather reanalysis. Currently, the most accurate is the ERA-Interim reanalysis produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Dee *et al.* 2011). The reanalysis data were extracted from www.ecmwf.int, accessed 20 May 2017.

Despite the higher resolution of ERA-Interim data compared with soundings, we found abnormally low values of cHaines for fires otherwise documented with great instability. Therefore, we investigated soundings stored by University of Wyoming (www.weather.uwyo.edu, accessed 25 May 2017).

A t -test on paired values of cHaines (retrieved from ERA-Interim and soundings) returned a significant difference in means ($P < 0.05$). As a result, we only kept the sounding values and did not consider the ERA-Interim data.

Model analysis

We used the generalised linear model (glm) function of R software v. 3/2/5 (R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, see <http://www.R-project.org/>, accessed 27 February 2017) to build a binomial logistic regression model of entrapment probability. We started by

fitting the complete set of predictor variables together. Then, we used a backward stepwise process removing less significant variables up to the best model. The best model was identified by the lowest Akaike Information Criterion (AIC) (Burnham and Anderson 2003). We tested all the two-way interactions in this model and retained any that reduced AIC. We ran the process twice. The first time, the initial set of variables was made of slope, ruggedness, ChgBef, ChgAft, FFDI and cHaines. The second time we replaced FFDI by its inputs: W , H , T and D .

Results

Entrapments

Forty-five incidents had sufficient data to conduct the analysis (Table 6, Fig. 9). Most of them were in south-eastern Australia.

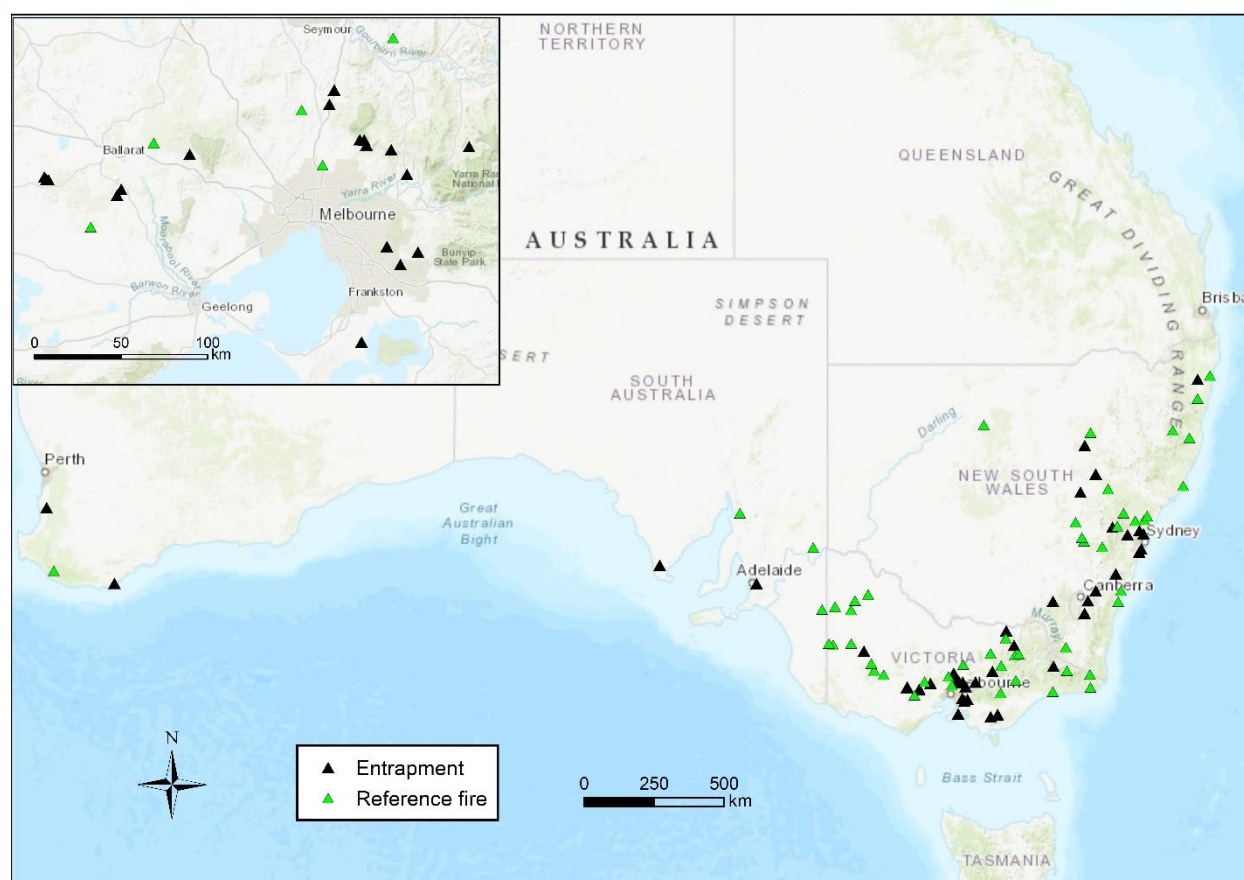


Figure 9. Location of entrapment and reference fires.

Most entrapments happened during large (>100 ha) or very large (>1000 ha) fires (Fig. 10a). All the entrapments happened between 1100 and 2100 hours, with a normal distribution centred on 1600 hours (Fig. 10b). The time between fire ignition and entrapment randomly varied from 30 min to several days (Fig. 10c). Most entrapments occurred in eucalyptus forest stands but it's worth noting that 12 occurred in grasslands and only three in shrublands (Fig. 10d). The consequences of the individual entrapments varied over time (Fig. 11). Although the number of reported entrapments did not decrease from 1980 to 2017, the fatalities followed a declining trend. The high scores in 2009 (30 injured and 6 trucks destroyed) altered the declining trend for injuries and vehicle loss.

Table 6. Distribution of entrapments across states

State	Entrapments	Fatalities	Injured	Lost vehicles
New South Wales (NSW)	15	15	26	7
Victoria (Vic.)	26	20	44	12
Southern Australia (SA)	2	3	6	2
Western Australia (WA)	2	1	3	3
Total	45	39	79	24

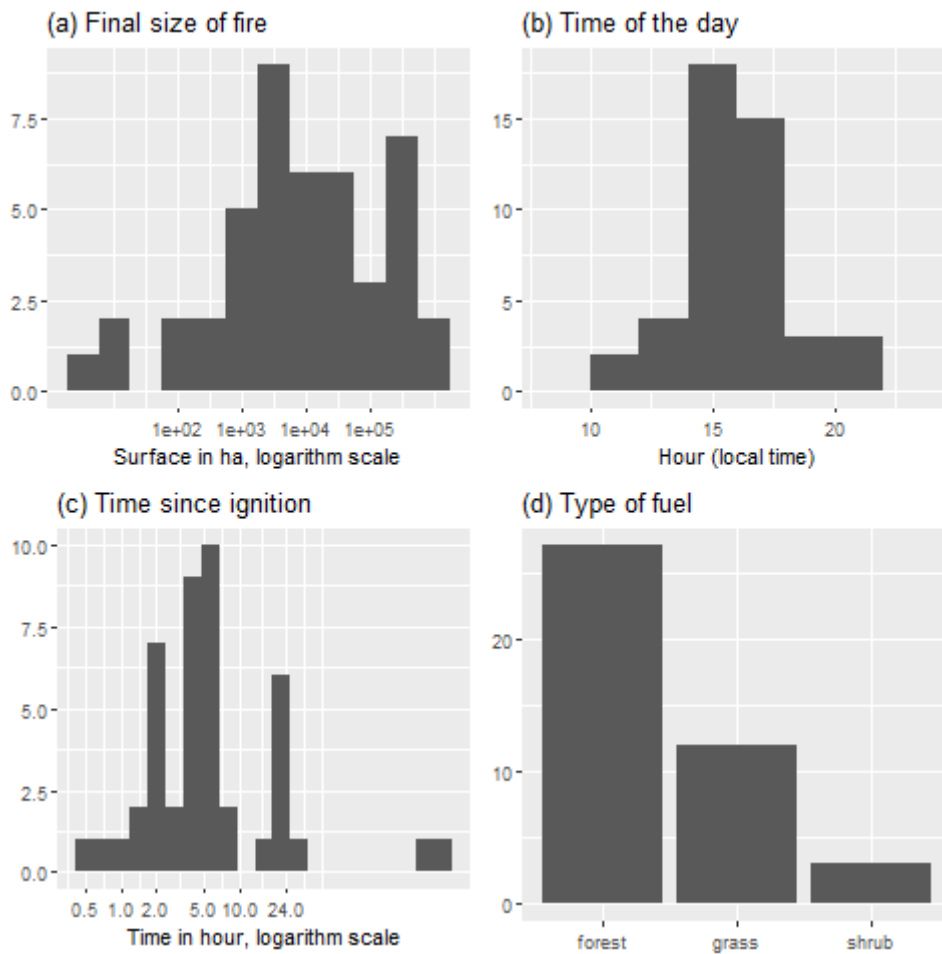


Figure 10. Distribution of entrapments regarding (a) final size of fire, (b) time of the day, (c) time since ignition and (d) type of fuel.

Terrain analysis returned similar distributions for both slope steepness (Fig. 12a) and ruggedness (Fig. 12b). The slope ranged from 1 to 30°. For both TRAP and SAFE, the mean was 9°. The ruggedness ranged from 14 to 672 m. The mean was ~200 m (191 m for TRAP, 202 m for SAFE) and the standard deviation was smaller for TRAP ($P = 1.2 \times 10^{-2}$).

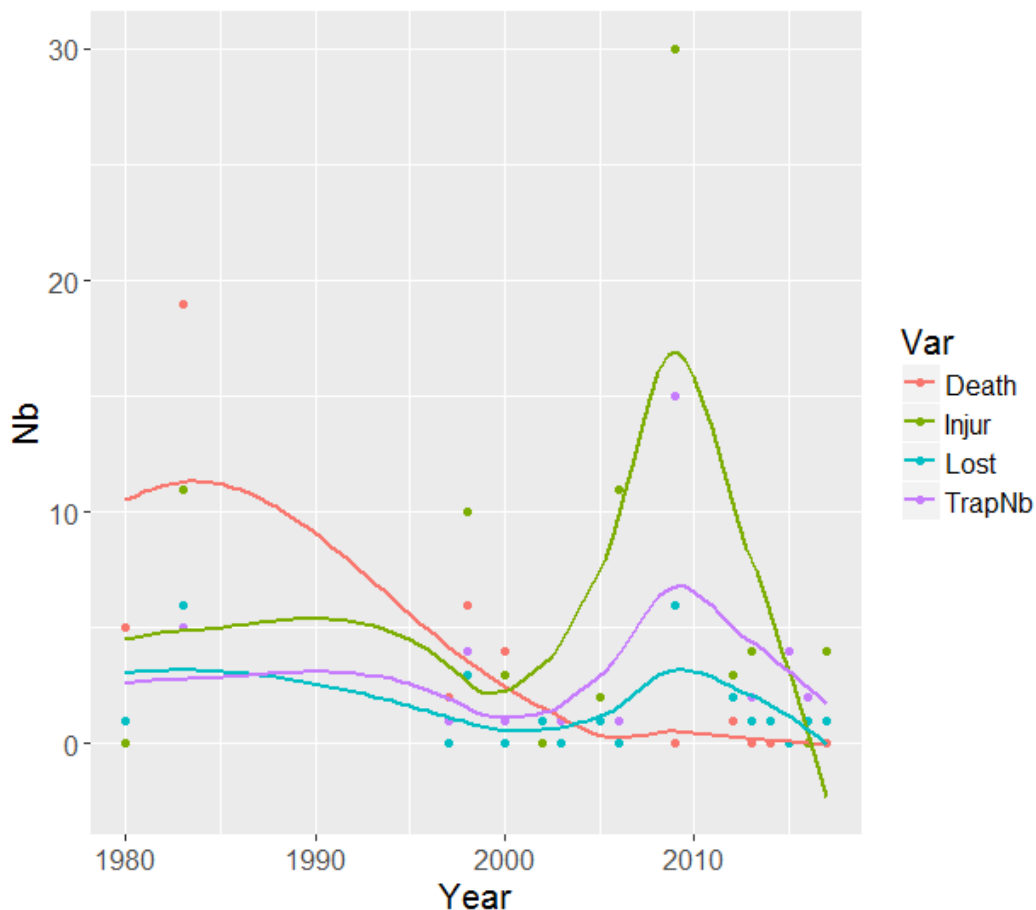


Figure 11. Number of entrapments (*TrapNb*), deaths, injured firefighters (*Injur*) and destroyed vehicles (*Lost*) reported per year. The local regression (LOESS) smoothing method was used to draw the lines.

Entrapment-reference comparison

Regarding weather analysis, the mean of *T* (Fig. 12c), *W* (Fig. 12e) and *FFDI* (Fig. 12i) were higher ($P < 0.05$) for TRAP than SAFE: 34 v. 27°C, 36 v. 21 km h⁻¹ and 59 v. 19. The mean of *H* (Fig. 12d) was lower ($P = 4.1 \times 10^{-5}$) for TRAP: 20 v. 36%. The mean of *D* (Fig. 12h) was similar ($P > 0.05$) for TRAP and SAFE, respectively 9 and 8. The standard deviation was smaller for TRAP regarding *H* ($P = 1.3 \times 10^{-5}$) and *FFDI* ($P = 5.4 \times 10^{-11}$); it was larger for TRAP regarding *W* ($P = 1.3 \times 10^{-6}$). 42% of TRAP occurred after a change of wind direction, significantly more than SAFE, 2% ($P = 4.1 \times 10^{-6}$, Fig. 12f). The proportion of TRAP that occurred before a change of wind direction, 29%, was not significantly different from the proportion of SAFE, 20% ($P > 0.05$, Fig. 12g). The mean *cHaines* was higher ($P = 2.4 \times 10^{-3}$, Fig. 12j) for TRAP (10 v. 7) and the standard deviation was similar.

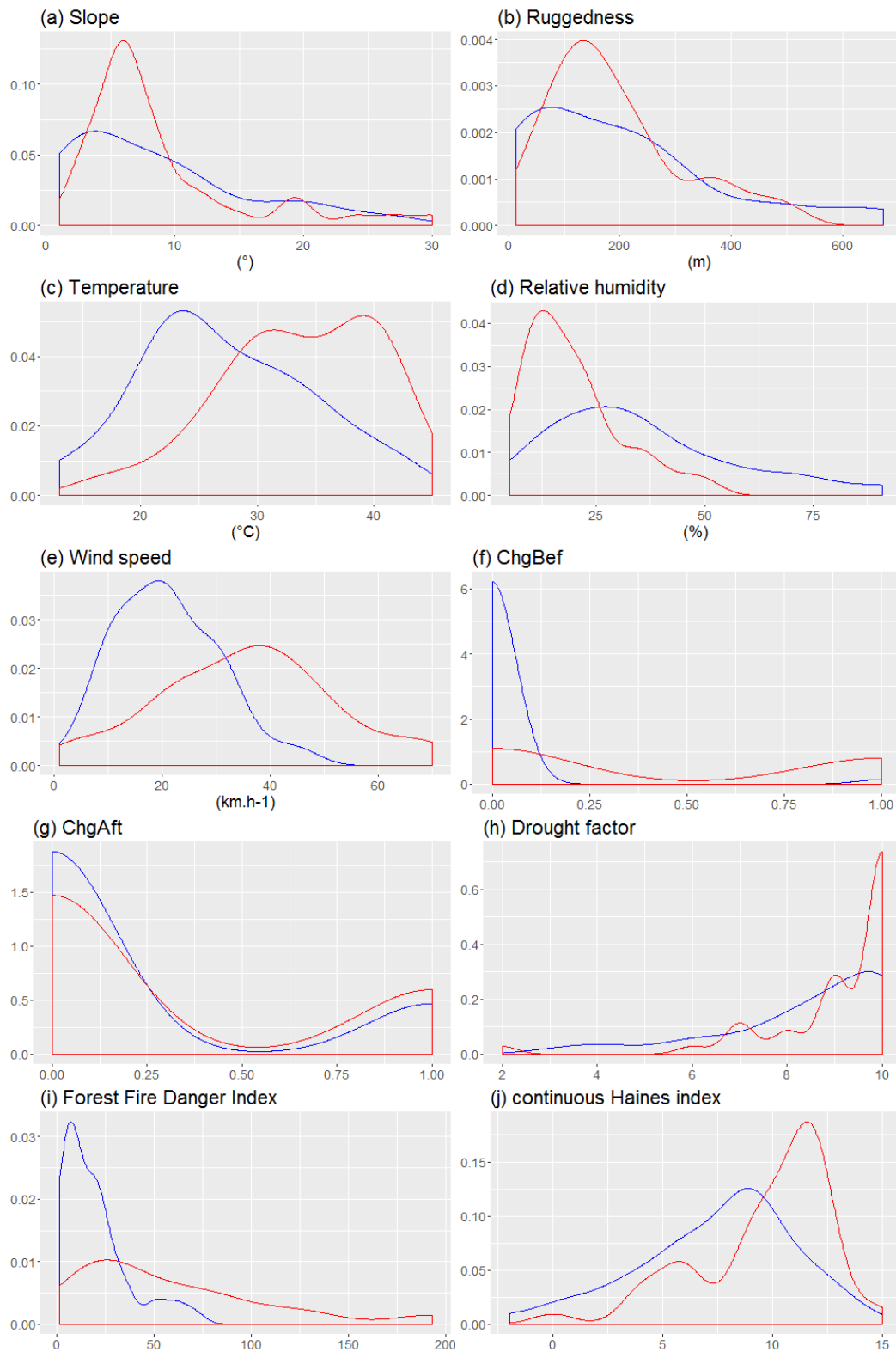


Figure 12. Density curve of TRAP (red) and SAFE (blue) for each investigated predictor: (a) slope, (b) ruggedness, (c) temperature, (d) relative humidity, (e) wind speed, (f) change in wind direction before entrapment, (g) change after entrapment, (h) drought factor, (i) forest fire danger index and (j) continuous Haines index.

Model analysis

The regression modelling with FFDI identified Slope, ChgBef and FFDI as the most prominent drivers of entrapment (Table 7a). The model captured 39.7% of deviance. Table 8a displays the estimates of this first model.

The regression modelling with the individual weather components of FFDI returned a lower AIC than with FFDI (Table 7b) and identified Rugd, ChgBef, H and W as the most prominent factors. The model was even better with W and ChgBef interacting (estimates in Table 8b); it captured 47.1% of deviance. As shown in Fig. 13, the maximum probability occurs with a change in wind direction before the event, regardless of the wind speed when both the ruggedness is high and the relative humidity low (red solid line), or regardless of the ruggedness and relative humidity with wind speeds stronger than 20 km h⁻¹ (other solid lines). With no change in wind direction, the probability increases markedly as the wind speed increases between 20 and 45 km h⁻¹ (dotted lines).

Table 7. Akaike Information Criterion (AIC) returned by the binomial logistic regression.

In the first part of the table (a), the predictors are slope, ruggedness (Rugd), change in wind direction before entrapment (ChgBef), change after entrapment (ChgAft), Forest Fire Danger Index (FFDI) and continuous Haines Index (cHaines). In the second part (b), FFDI is replaced by temperature (T), relative humidity (H), wind speed (W) and drought index (D). The lower the AIC the better the model

Predictors	AIC
<i>(a) Model with FFDI</i>	
Slope, Rugd, ChgBef, ChgAft, FFDI, cHaines	91.1
Slope, Rugd, ChgBef, ChgAft, FFDI	89.1
Slope, Rugd, ChgBef, FFDI	87.1
Slope, ChgBef, FFDI	85.2
Slope, ChgBef, FFDI, interaction Slope*ChgBef	83.1
<i>(b) Model with inputs of FFDI</i>	
Slope, Rugd, ChgBef, ChgAft, T , H , W , D , cHaines	88.6
Slope, Rugd, ChgBef, ChgAft, T , H , W , cHaines	86.6
Slope, Rugd, ChgBef, T , H , W , cHaines	84.6
Rugd, ChgBef, T , H , W , cHaines	82.8
Rugd, ChgBef, T , H , W	81.7
Rugd, ChgBef, H , W	80.5
Rugd, ChgBef, H , W , interaction Rugd* W	73.2

Discussion

Our analyses indicate that entrapment generally occurs during large fires, and after some hours of development, which is consistent with the results of Lahaye *et al.* (2016) in Europe. Butler *et al.* (1998) stated that high-intensity fire behaviours are more likely to develop on large fires and Sharples *et al.* (2016) discussed how deep flaming can cause a fire to escalate into an extreme fire. So, we can assume that entrapments in Australia mostly happen during large fires that develop extreme behaviours. However, this observation should not exclude the fact that small fires can also exhibit dynamic behaviours. Even if the number of small fires which lead

to entrappings in our dataset was low, many have been reported in other countries (Wilson 1977).

Table 8. Regression estimates for the best entrainment models (a) with FFDI and (b) with individual weather variables

The contributing variables are slope, ruggedness (Rugd), change in wind direction before entrainment (ChgBef), FFDI, relative humidity (H) and wind speed (W)

	Estimate	s.e.	z-value	P
<i>(a) With FFDI</i>				
(Intercept)	-2.45	0.68	-3.59	3.2×10^{-4}
Slope	0.04	0.04	1.00	0.32
ChgBef	-12.37	1686.82	-0.01	0.99
FFDI	0.05	0.01	3.58	3.4×10^{-4}
Slope:ChgBef	6.62	843.41	0.01	0.99
<i>(b) With Individual weather variables</i>				
(Intercept)	-6.31	2.07	-3.03	2.4×10^{-3}
Rugd	0.02	0.01	2.64	8.1×10^{-3}
ChgBef	4.87	1.37	3.55	3.8×10^{-4}
H	-0.06	0.03	-2.38	2.4×10^{-3}
W	0.25	0.07	3.34	0.02
Rugd:W	-7.1×10^{-4}	$3.0e^{-4}$	-2.37	0.02

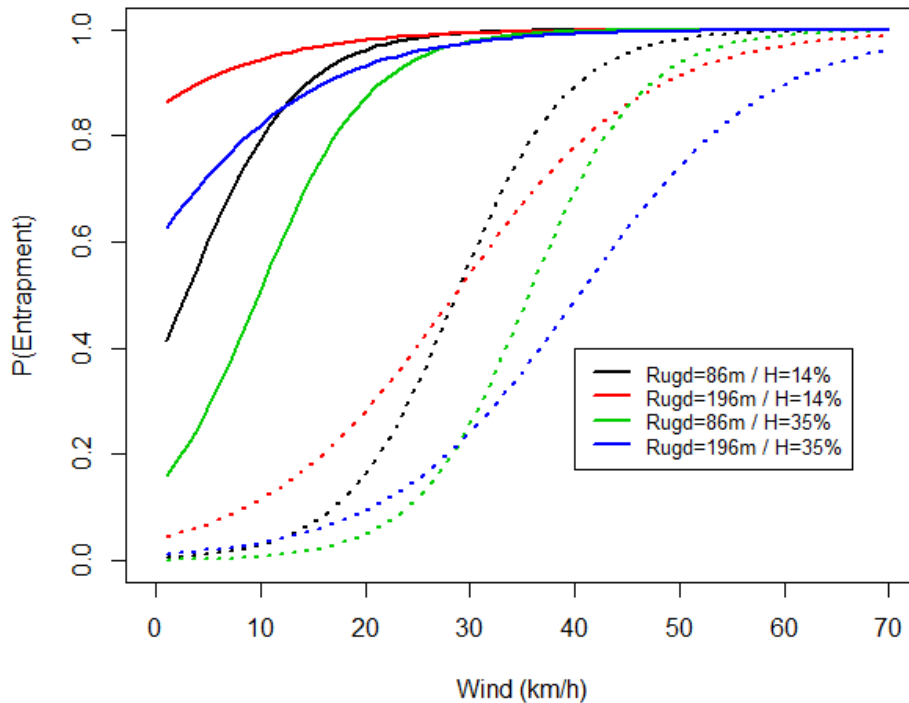


Figure 13. Predictions from the model of entrainment probability depending on wind for different values of ruggedness ($Rugd$) and relative humidity (H). The solid lines correspond to changes in wind direction before entrainment; the dotted lines correspond to no change in wind direction.

As grass fires have lower intensity than forest fires (Alexander and Cruz 2011; Cruz *et al.* 2015), well-equipped firefighters are unlikely to be caught on grass in steady conditions. However, as expressed by Alexander and Fogarty (2002) and Cheney and Sullivan (2008), fires spreading in grass are also more responsive to changes in wind or terrain. The 12 entrapments we found in grasslands support the idea that fire spreads driven by wind changes in this type of fuel can catch firefighters off guard, thereby placing them in danger.

Because of the lack of an interstate database for accidents, many entrapments in Australia may not have been considered in this study. However, most of the fatal ones after 1980 have led to coronial inquiries and have consequently been investigated in this study. The observed reduction in deaths over time is most likely due to improved fire fighting vehicles and equipment rather than any change in fire behaviour. Most of the fatal entrapments in the 1980s occurred with petrol powered trucks, sensitive to fuel tank explosions and engine failures (Luke and McArthur 1978; Wilson 1983). Moreover, the space in the cabin was not sufficient to shelter all the crew and was not protected by water spray-bars or similar measures. Finally, some victims were not wearing suitable personal protective equipment. The vehicles and equipment that most fire services provide today ensure a better level of thermal protection (Legislative Council 2000; Cruz *et al.* 2016). It is unclear if the constant number of entrapments reported over the last few years relates an actual trend or is due to better data collection. However, the large number of entrapments, injured firefighters and destroyed vehicles in 2009 shows that the risk remains important, especially during severe weather events.

Because we selected a reference set of fires with sizes similar to those that led to entrapment, many of the reference fires are large. These large fires in southern Australia principally affect undulating or rugged terrain (Sharples 2009; Zhang *et al.* 2016). This accounts for the mean ruggedness and slope of entrapment and reference fires being equivalent. McRae and Sharples (2013) proposed a minimum ruggedness threshold of 150 to characterise undulating terrain. With this threshold, 55% of the entrapments occurred on undulating or rugged terrain. However, 80% of entrapments occurred above a threshold lowered to 100 and 93% occurred above a threshold of 50. The spatial resolution of the DEM affects terrain analysis and threshold determination so that, with DEM30, we suggest that entrapments are more likely to occur above a ruggedness threshold between 50 and 100.

The present study failed to link entrapments with slopes steeper than 25°, the average threshold suggested for flame attachment (Edgar *et al.* 2016) or for vorticity-driven lateral spread on leeward slopes (Raposo *et al.* 2015; Simpson *et al.* 2016). In the best model developed, ruggedness even appeared to be a better predictor of entrapments than slope steepness. This emphasises that some dangerous fire behaviours may be induced by topographic slopes located more than 200 m away from the entrapment locations. Further research is required to understand the link between topographically driven fire behaviours and entrapments.

Sudden changes in wind direction over 45° are clearly the main driver of entrapment in the study area. Although seldom present on fires without entrapments, ChgBef drove 42% of entrapments, independent of the other predictors. We can assume that ChgBef directly causes entrapments, as the flanks turn into active head fires (Luke and McArthur 1978). This finding is consistent with the concept of the 'Dead-Man Zone' espoused by Cheney *et al.* (2001). Although several different phenomena can produce a wind shift (Potter and Hernandez 2017),

the passage of cold fronts is responsible for most wind changes in south-eastern Australia. We examined whether the strong and gusty winds that develop in pre-frontal air masses (Mills 2005; Grose *et al.* 2014), which are associated with hot and dry air, could also be entrapment drivers. Because observations from weather stations may not capture the details of these gusty winds, we also recorded changes of wind direction after entrappings. This parameter appears not to be a clear predictor of entrapment risk. Nevertheless, it is worth noting that 71% of entrappings occurred in the hour following or in the 6 h preceding a change in wind direction.

FFDI appears to be a good predictor of entrapment risk. This is consistent with the study of Lahaye *et al.* (2014), which established the FWI as a good predictor of operational fire danger in France. It is worth noting that the FFDI used here is the current value at the time of entrapment. It can be widely different from the daily value provided to assess fire danger, especially during gusty winds or frontal passages. FFDI captures a large variety of potential drivers, from fuel availability to instantaneous wind, temperature and relative humidity. Therefore, it is necessary to investigate the inputs of FFDI to establish a link between entrappings and fire behaviours. Because the drought factor is at its highest possible value (10) for long periods in the fire season, it is not a good predictor of entrapment risk. The most influential components of FFDI that were revealed to drive entrappings are wind speed and relative humidity. This differs from the results of Page and Butler (2017), who failed to find any significance of wind in entrappings in the United States. However, it is consistent with other results in Europe: Lahaye *et al.* (2016) demonstrated the role of strong winds in the most dangerous fires in France and Diakakis *et al.* (2016) highlighted the influence of low relative humidity on fatalities in Greece. It is worth noting that wind speed is otherwise one of the key parameters of most dynamic fire behaviours and plays an important role in fire eruption, vorticity-driven lateral spread and mass spotting (McArthur 1967; Sharples, Gill, *et al.* 2010; Sharples *et al.* 2016). In the same way, Ellis (2015) demonstrated the importance of low relative humidity in increasing the ignition success of small firebrands in eucalyptus litter, therefore contributing to mass spotting and fire escalation. The significance of strong winds and low relative humidity in both dynamic fire behaviours and entrappings suggest that the entrappings may be caused by the dynamic behaviours induced by the weather drivers and their interaction with the terrain.

Although air temperature is not a significant driver in the models we produced, the mean temperature that is associated with entrappings is fairly high (34°C). This is consistent with the study of Cardil and Molina (2015), which highlighted the role of heat waves, combined with drought, in large fires and fatalities in Spain. Sharples *et al.* (2016) also noted the potential effects of heat waves on the flammability of larger fuel elements, which may contribute to extreme fire development. The findings regarding air temperatures are also consistent with hot temperatures being associated with convectively driven fires that propagate with massive spotting and erratic behaviours (Costa *et al.* 2011).

The higher the value of the cHaines index, the more the heated air mass is dynamically lifted. Instability is suspected to contribute to mass spotting (Werth *et al.* 2016) and it is likely to turn deep flaming into extreme fires (Sharples *et al.* 2016). Our results show that cHaines is not a main driver of entrappings. This is likely because entrappings may be driven by other factors even in a stable environment. Nevertheless, the high values of cHaines found for most entrappings suggest that instability can play a secondary role in entrappings. If entrappings

drivers (ChgBef, W, H or steep terrain) are present, instability may contribute to increase the danger in accelerating the processes or decreasing the thresholds.

Our study reveals the contribution of the various weather and terrain parameters in firefighter entrapments in Australia. Of course, the exact process leading to entrapment could be much more complicated than has been considered; for example, it could involve other aspects of the fire environment, in addition to human factors. However, a good comprehension of the most dangerous situations is required to issue appropriate safety guidance. The next step is to elucidate the individual contribution of different modes of dynamic fire propagation such as flame attachment, VLS and mass spotting in entrapments.

Conclusion

More and more studies focus on firefighter entrapments during wildfires, especially in the United States where comprehensive databases are now available. In Australia, information is scattered and the fire community may follow assumptions about the predominance of adverse weather, especially changes in wind direction, in causing entrapments.

For the first time, a review of past entrapments has identified the contribution of different weather and terrain factors in Australia. The results indicate that changes in wind direction represent a real threat for firefighter's safety in this part of the world, leading to many entrapments. Interactions between strong wind and topography (e.g. steep slopes) are also shown to influence the likelihood of entrapments, as the local or small scale arrangement of these parameters may induce unpredictable or unexpected fire spreads. Finally, this work identifies several secondary parameters (i.e. low relative humidity, high temperature and air instability), which may both contribute to the likelihood of entrapments, and play a role in determining the severity of fire development.

Acknowledgements

The study was funded by New South Wales Rural Fire Service and University of New South Wales. We thank the Victorian Country Fire Authority for providing access to quality reports and Raphaele Bianchi for providing access to the CSIRO database. We greatly appreciated the comments and suggestions of the anonymous reviewers; their contributions improved the manuscript.

Chapitre III:

Comportements du feu dynamiques et accidents

Ce chapitre a été soumis avec le titre suivant : *Dynamic fire behaviour conditions in firefighter entrapments.*

Il est en cours de révision au moment de la rédaction de ce mémoire. Il est reproduit ici en l'état ; cependant, les équations, tables et figures sont réindexées pour le mémoire de thèse, les références bibliographiques sont reportées en fin de mémoire et l'annexe, appelé ici Appendix 4, apparaît en Annexe 4 du mémoire.

Résumé

En dépit de l'application de procédures de sécurité, des pompiers continuent à être piégés lors de feux de forêt.

Le changement brutal de direction du vent ainsi que les comportements du feu dynamiques qui se produisent en terrain accidenté, tels que les feux éruptifs ou les effets vortex sur pentes déventées (VLS), sont considérés comme des phénomènes dangereux pour les pompiers. Ils peuvent en effet les surprendre avec des vitesses de propagation et des intensités de feu exceptionnelles. Cependant, aucune étude ne s'est intéressée au rôle respectif de ces phénomènes dangereux dans un échantillon important d'accidents.

Nous avons analysé ici plus de 100 accidents décrits dans des publications ainsi que dans des rapports internes aux services d'incendie et de secours à travers le monde. Après avoir distingué trois types de feux (influencés par la topographie, guidés par le vent et convectifs), nous avons cherché la présence d'un changement de direction du vent, d'un canyon, de pentes propices à l'attachement de la flamme et de pentes déventées propices à l'effet VLS dans chacun des accidents.

Les résultats montrent que l'une au moins des conditions étudiées est présente dans 69% des accidents et que, selon le type d'incendie, ce ne sont pas les mêmes conditions dynamiques qui sont associées aux accidents. Lors des feux convectifs, les accidents peuvent se produire sans aucune des conditions ou à plus de 600 mètres des zones propices à un comportement dynamique tel que l'effet VLS. Lors des incendies influencés par la topographie, en revanche, 94% des accidents se sont produits sur des pentes propices à l'attachement de la flamme. Enfin, les pentes déventées propices à l'effet VLS sont les conditions le plus souvent associées aux accidents lors des feux guidés par le vent.

Ces résultats montrent qu'il est nécessaire de prendre en compte les configurations propices aux comportements du feu dynamiques pour faire évoluer les consignes de sécurité des pompiers. Ils montrent également la nécessité de moduler les consignes en fonction du type d'incendie.

Dynamic fire behaviour conditions in firefighter entrapments.

Sebastien Lahaye^{A,E}, Jason Sharples^A, Stuart Matthews^B, Simon Heemstra^B, Thomas Curt^C, Christelle Hely^D

^A School of Physical, Environmental and Mathematical Sciences, University of New South Wales Canberra, ACT 2600, Australia.

^B New South Wales Rural Fire Service, 15 Carter St Lidcombe, NSW 2141, Australia.

^C Irstea RECOVER Mediterranean Ecosystems and Risks, route Cézanne, 13182 Aix-en-Provence cedex 5, France.

^D EPHE, PSL Research University, ISEM, CNRS, Univ. Montpellier, IRD, CIRAD, INRAP, UMR 5554, F-34095 Montpellier, France.

^E Corresponding author. Email: s.lahaye@adfa.edu.au

Abstract

Despite safety guidance, firefighters still get entrapped by wildfires. It is now well established that changes in wind direction and dynamic fire behaviours associated with steep and confined topography, such as fire eruption and vorticity-driven lateral spread, have the potential to surprise firefighters with unexpectedly high rates of spread and intensity. However, the respective contribution of these aspects of fire behaviour in a large set of entrapments has not yet been investigated.

We have analysed more than 100 entrapments described in publications and fire agencies' internal reports across the world. We distinguish three types of fire: topography-driven, wind-driven and convective fires, and assess the potential contributions of changes in wind direction, canyon configurations, steep slopes prone to flame attachment and leeward slopes prone to vorticity-driven lateral fire spread in firefighter entrapments.

Our results show that one or more conditions for dynamic fire behaviours can be associated with 69% of entrapments. 94% of the entrapments in topography-driven fires happened on steep slopes prone to flame attachment. Finally, slopes prone to vorticity-driven lateral fire spread were the most prominent factor associated with entrapments during wind-driven fires. The results emphasize the need to account for dynamic fire behaviours in firefighter safety guidance and to adapt this guidance to different types of fire.

Additional keywords: fire safety, topography-driven fire, wind-driven fire, convective fire, eruptive fires, vorticity-driven lateral spread, canyon, flame attachment, ruggedness

Introduction

Books have related epic stories of firefighters entrapped by wildfires over the 20th century: for example, Ed Pulaski saving his team in Idaho in 1910 (Pyne 2001) or the Mann Gulch incident which resulted in the deaths of young smokejumpers in 1949 (Maclean 1992). More recent fatal entrapments have also been fully documented (Butler *et al.* 1998; Viegas *et al.* 2009). Indeed, despite improvements in firefighting tactics and personal protective equipment, entrapments still occur (Mangan 2007; Alexander and Buxton-Carr 2011; Diakakis *et al.* 2016; Lahaye, Sharples, *et al.* 2018).

Lahaye, Curt, *et al.* (2018) described the contribution of weather conditions to dangerous fires in France; Diakakis *et al.* (2016) and Blanchi *et al.* (2014) related weather conditions to fatalities, either civilians or responders, in Greece and Australia respectively. Lahaye, Sharples, *et al.* (2018) also investigated the role of weather and terrain in entrapments in Australia; while they emphasized the predominant influence of wind shifts and strong winds, they also raised the possible contribution of dynamic fire behaviours induced by specific terrain arrangements.

Studies have provided operational tools for firefighters, pointing out dangerous zones (Cheney *et al.* 2001) or conversely specifying safety distances (Butler 2014). Page and Butler (2017) proposed empirical models for safety distance and survival distance after reviewing 72 entrapments in the USA. However, none of these studies focused on the fire behaviours that contributed to the entrapments. It's worth noting indeed that entrapment witnesses have regularly talked about “blow-up” (Butler *et al.* 1998), “fireball” (Pearce *et al.* 2004), “eruption” (Viegas *et al.* 2009) or “ferocious fire” (Ferguson 2016). This type of language, reported in most investigations, suggests that fires generally develop extreme rates of spread and intensity near the entrapment location. This unexpected behaviour, referred to here as ‘dynamic fire behaviour’, may partly explain why firefighters get caught.

Viegas and Simeoni (2011) described how the eruptive behaviour of forest fires caused several entrapments in upslope configurations, especially canyons. Recent research has suggested that flame attachment, produced or enhanced by the ‘trench effect’ (Drysdale *et al.* 1992), could cause some of these eruptions (Edgar *et al.* 2016). Other studies have highlighted the occurrence of vorticity-driven lateral spread, which can dramatically change fire shape and direction of propagation (Sharples *et al.* 2012; Simpson *et al.* 2013). However, the operational implications of these dynamic behaviours and their respective safety significance have not yet been investigated.

Distinguishing fires according to their spread patterns is a useful step towards improving fire spread and behaviour prediction (Duane *et al.* 2016). Costa *et al.* (2011) introduced three fire types: topography-driven, wind-driven and convective. Duane *et al.* (2015) detailed the environmental drivers of two fire types (climate factors for wind-driven fires and forest fuels for convective fires) and found that topography-driven fires occupy a wider range of conditions.

We consider here these three types of fire and question how much wind shift, flame attachment up steep slopes and in canyon configurations, and vorticity-driven lateral spread may have respectively contributed in entrapments for each type. We reviewed more than 100 accidents across the world and investigated the combined influence of the key weather elements and the terrain arrangement in the final path of fire leading to entrapment.

The aim is to improve the firefighter safety guidance by integrating the possible effects of extreme fire behaviours.

Data and methods

Entrapments

Although comprehensive records of incidents are available in the USA (Page and Butler 2017), similar systematic and centralised records do not exist in either Australia or Europe. We reviewed the reports and data compiled by Lahaye, Curt, *et al.* (2018) in France and by Lahaye, Sharples, *et al.* (2018) in Australia. These two sets of entrapment data are mainly built from fire agencies' unpublished internal reports and from interviews with firefighters. Published papers completed the Australian set (Coroners Court of Wollongong 1981; Cheney *et al.* 2001; Stevenson 2001; Schapel 2007; Cruz *et al.* 2012; Ferguson 2016). We also considered one entrapment in New Zealand (Pearce *et al.* 2004), one in Portugal (Viegas *et al.* 2009), one in Croatia (Viegas *et al.* 2009), two in Greece (Xanthopoulos 2007) and five in Spain, reported in Viegas *et al.* (2009), Zamora (2007) and in unpublished reports. Finally, we extended the study to two fully documented cases in the USA: Mann Gulch (Maclean 1992) and South Canyon (Butler *et al.* 1998). In addition to the reported analyses and interviews, we visited 38 of the sites in two European countries (France and Spain) and two states in Australia (New South Wales and Victoria) to precisely locate the entrapments and better understand the circumstances surrounding the incidents.

The complete data set was comprised of 131 incidents distributed across three continents (Fig. 14). From this we removed insufficiently detailed cases, vehicle destructions after mechanical failure, and one entrapment reportedly caused by the misuse of an ignition torch. The final set is provided in Appendix 4. All the incidents in the final dataset correspond to fires suddenly exhibiting high rates of spread and intensity. They are all designated 'entrapments' in this study whatever their consequences: death, injury, vehicle destruction or near miss. The last situation describes dangerous fire behaviours observed by firefighters who did not suffer injury or major damage to appliances because they were able to reach safety in sufficient time. Apart from Mann Gulch (1949), the period covered is 1979-2017.

Classification

Costa *et al.* (2011) proposed a classification of three types of fires: topography-driven, wind-driven and convective. Although weather and landscape factors can provide information on the probability of occurrence of each type (Duane *et al.* 2015), the prediction and determination of the type of a fire depends on a complex combination of factors also including vegetation fuels. The expertise of fire analysts is generally required to realise these predictions (Gibos *et al.* 2014; Duane *et al.* 2015).

In this study, we used two parameters to classify the fire types that lead to the entrapments: the topographical limits of the fire spread and the rate of growth.

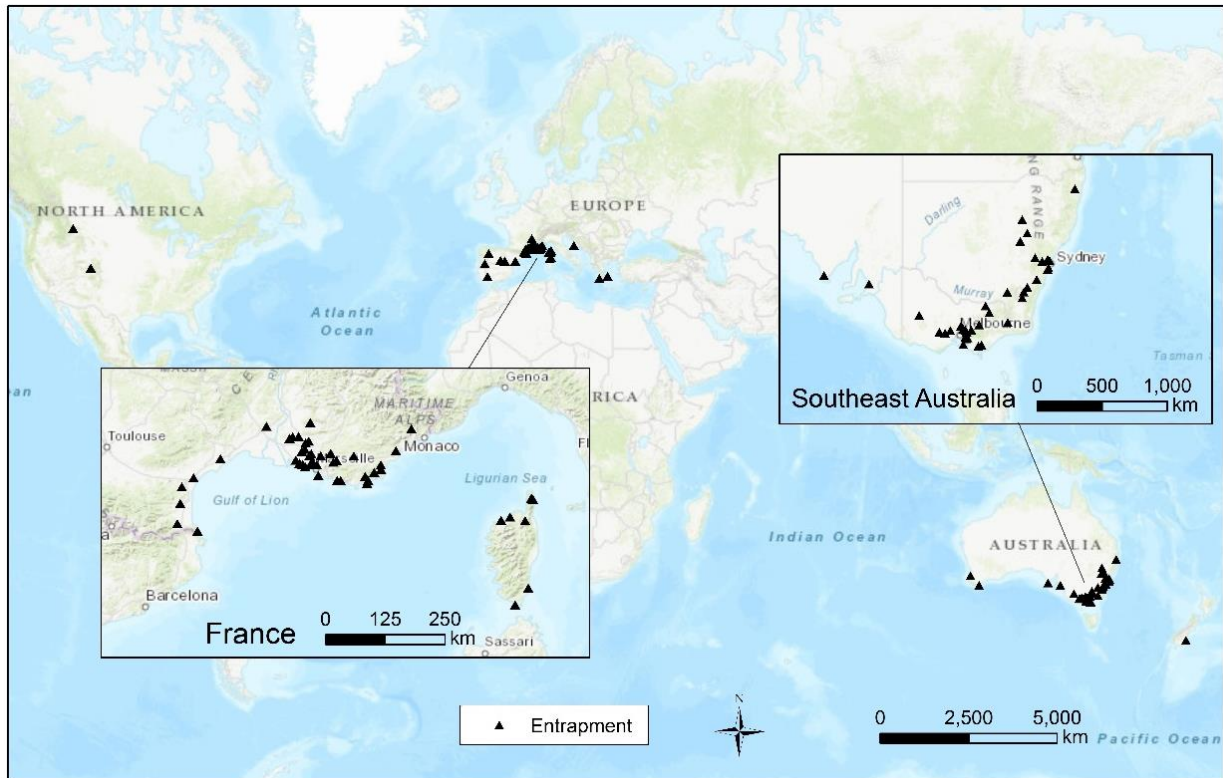


Figure 14. Location of entrapments.

In topography-driven fires (T1), spread is constrained by air flow along the slopes. The fire's propagation is driven by topography and by local breeze effects, which act independently of the synoptic wind flows in the region (Costa *et al.* 2011). We considered the spread of the fires at the time when the entrapments occurred. When the spread followed upslopes and stopped on the ridges, we classified the fire as topography-driven.

The distinction between wind-driven fires (T2) and convective fires (T3) is more difficult to establish. While wind-driven fires spread with a narrow shape in the direction of the wind, convective fires are driven by the interaction between high energy release from high fuel load combustion and atmospheric conditions (Rothermel 1991). Convective fires spread with massive spotting and exhibit broader 'footprints' than can be accounted for under wind-driven conditions. We used the rate of growth of the fire from ignition to entrapment, in ha h^{-1} , to determine the most erratic fires, classified as convective fires. When the ignition occurred more than eight hours before the entrapment, we reduced the investigation of the rate of growth to the two hours preceding entrapment. (Fernandes, Pacheco, *et al.* 2016) used this rate of growth indicator and found that 416 ha h^{-1} is the break point value for the upper quartile of fires larger than 2,500 ha in Portugal. Lahaye, Curt, *et al.* (2018) also used this indicator with a slightly different method of calculation and found that 351 ha h^{-1} was the 90th percentile growth rate of fires larger than 200 ha in France. The last study highlighted that fires above this threshold are driven by different drivers than the ones below and it suggested that these fast-growing fires could be convective fires. In accordance with these results, we chose in this study a value of 400 ha h^{-1} to distinguish wind-driven fires, below, and convective fires, above.

Fire type descriptors

The fire type indicators we used, the topographical limits of the fire spread and the rate of growth, are obviously not suitable as predictors in a forecasting perspective. So, we investigated environmental factors useful to determine the type of fire likely to occur. Following the findings of Lahaye, Curt, *et al.* (2018) and Lahaye, Sharples, *et al.* (2018), we focused on two weather variables and one terrain descriptor. All the variables are described in Table 9. For each entrapment, we extracted both the weather variables, wind speed (wind, in km h⁻¹) and fire weather index (FWI), from the records of the closest automatic weather station from the entrapment site within the hour. When the data were not provided in fire reports, we interrogated the national weather agencies databases (Meteo France 2016; Australia Bureau of Meteorology 2017). Wind is the 30-minute average 10-m open wind speed.

Table 9. Investigated variables

Variable	Description
Wind (km h ⁻¹)	10-m height average wind speed
Shift	Change of wind direction over 45°
FWI	Fire Weather Index
Ruggedness (m)	Elevation range 1.5 km around entrapment
Attachment	Upslope > 20° at entrapment
Canyon	Concave configuration at entrapment
VLS	Vorticity-driven lateral spread prone landscape in the fire path
VLS distance (m)	Distance between VLS location and entrapment

FWI is an integrative and unit-less index that was originally designed to forecast fire risk in Canada on the basis of daily weather conditions (Van Wagner 1987). It consists of sub-indices integrating surface weather data and rainfall over the previous 24-hours. FWI provides a uniform, numeric method of fire danger rating throughout an area. While New-Zealand and several European countries use FWI to describe the fire danger, Australia uses the Forest Fire Danger Index (FFDI), developed by McArthur (1967) as a combination of weather and fine fuel availability to determine the fire danger in dry eucalyptus forest. The meteorological parameters used are temperature, relative humidity and wind speed. The availability of the fuel is represented by the drought factor, which is a function of antecedent rainfall and soil moisture conditions. FWI and FFDI were empirically developed for different ecosystems, namely Canadian pine forest and Australian eucalyptus dry forest. While both are built on similar structures and input parameters, they provide varying assessment of the fire danger (Matthews 2009). Nevertheless Dowdy *et al.* (2010) found a relationship between FFDI and FWI to describe fire weather in Australia:

$$\text{If FFDI} \leq 20, \text{ then FWI} = 2.8\text{FFDI} - 0.3 \quad (3)$$

$$\text{If FFDI} > 20, \text{ then FWI} = 2.2\text{FFDI} + 10.8$$

We used this equation to convert the FFDI values in Australia into an equivalent FWI.

We accepted the FWI value proposed by Alexander (2000) for Mann Gulch fire.

Because of the possible scale of dynamic fire behaviours, it is important to explore the terrain beyond the precise location of the entrapments. Elevation residual analysis provides tools for this type of exploration (Gallant and Wilson 2000). As suggested by McRae (1992), we

calculated a ruggedness value representative of the range of elevation in an area extending 1.5 km from the investigated point. We calculated ruggedness values with ArcGIS 10.1 (Environmental Systems Research Institute *ESRI* 2012) using the SRTM 1 second-arc (~30 m) layer as input (USGS 2017). We used the focal statistic tool of neighbourhood in a radius of 50 grid cells and determined the difference of elevation between the highest and the lowest point in the area.

We used a Principal Components Analysis in the ADE4 (Dray and Dufour 2007) package for R (R Core Team 2016) to investigate how the weather and terrain descriptors were distributed amongst the different types of fire.

Dynamic behaviour configurations

We looked for changes in wind direction ('shift') and terrain arrangements prone to dynamic modes of fire propagation. We considered the likelihood of flame attachment on steep slopes ('attachment'), trench effect ('canyon') and vorticity-driven lateral fire spread ('VLS'), expressed as binary values representative of the presence of adequate conditions (Table 9). It is important to note that while flame attachment is a key part of the trench effect, we considered these factors separately to test whether confined terrain elements, such as canyons, present any additional risk for entrapment, beyond that presented by steep slopes alone.

'Shift = 1' indicates that a change in wind direction was recorded by the closest automatic weather station within the hour before the entrapment. We required that the change in wind direction exceeded 45°, assuming that any variation below that threshold was due to the normal variability of the wind as suggested by (Sharples, McRae, *et al.* 2010). In addition, we only considered wind shifts associated with wind gusts over 20 km h⁻¹, assuming that lower gust speeds indicated a weak and undetermined wind.

To search for attachment conditions, we considered the slope the fire ran through on the last 200 m distance before reaching the entrapment location. Wu *et al.* (2000) indicated that attachment occurs on slope steeper than 24°. This threshold, given by laboratory experiments, may be modified by wind (Sharples, Gill, *et al.* 2010). In this study, we identified attachment conditions for upslopes steeper than 20° ('attachment = 1').

We identified canyon conditions ('canyon = 1') for entrapments as a concave configuration of two slopes steeper than 20° facing each other, whether the fire arrived from below or above the entrapment location.

VLS can induce massive spotting likely to propagate the fire over long distances (Sharples *et al.* 2012), and so we investigated VLS conditions on the terrain the fires ran through over the last minutes before reaching the entrapment locations. VLS prone landscape are lee-facing slopes over 20° when the angle between the ridge and the wind direction is between 50 and 130° (i.e. wind perpendicular to the ridge or within 40° of this position) (Sharples *et al.* 2012). In addition, wind speed over 20 km h⁻¹ is required (Simpson *et al.* 2016). We identified VLS conditions ('VLS = 1') when the terrain surrounding the entrapment location met these requirements and we also recorded the shortest distance between VLS prone terrain and the entrapment location (VLS distance).

We used area-proportional Venn diagrams, with the Eulerr package (Larsson 2016) for R, to represent the contribution of wind changes and each of the dynamic behaviour configurations, along with their combinations in T1, T2 and T3 fires. Area-proportional Venn diagrams, a type of Euler diagram, are used to show the relations between several sets (Venn 1880) and thus to show the individual and cross contributions of several variables. The variables are represented by circles, whose areas are proportional to the presence of the variables. The overlapping of circles is also proportional to the joint presence of the variables.

Results

Our study set is comprised of 103 entrapments across three continents (Table 10 and Appendix 4). The repartition of entrapments between T1, T2 and T3 and their respective consequences are displayed in Table 11. T1 represents 16% of entrapments, 43% of deaths and 23% of injuries. T2 represents 55% of entrapments, 33% of deaths and 56% of injuries. T3 represents 28% of entrapments, 24% of deaths and 21% of injuries. 86% of T3 fires are in Australia.

T1 was associated with high values of ruggedness and weak winds; T3 was associated with high FWI (Fig. 15). As shown in Figure 16, the distribution of wind speed was similar ($p = 0.97$) for T2 (mean $36 \pm 18 \text{ km h}^{-1}$) and T3 (mean $37 \pm 16 \text{ km h}^{-1}$). The mean wind speed was smaller for T1 than for T2 and T3 ($p = 0.001$). The interquartile range of T3 FWI (73-211) starts above the interquartile range of T1 FWI (36-70). The mean FWI was higher for T2 than for T1 ($p = 0.014$) and was also higher for T3 than for T2 ($p = 0.001$). Apart from T2 outliers, only T3 had FWI above 168. The ruggedness was similar for T2 and T3 ($p = 0.85$); it was higher for T1 ($p < 0.001$). The interquartile range of T1 ruggedness (291-572 m) starts above the interquartile range of T2 and T3 ruggedness.

Table 10. Distribution of entrapments across states

	State	Nb. of Entrapments	Deaths	Injuries
Australasia	New South Wales	14	15	22
	Victoria	25	20	44
	Southern Australia	2	3	6
	Western Australia	2	1	3
	New Zealand	1	0	4
<i>Subtotal Australasia</i>		<i>44</i>	<i>39</i>	<i>79</i>
Europe	France	48	27	45
	Spain	5	26	2
	Portugal	1	6	0
	Croatia	1	12	1
	Greece	2	7	0
<i>Subtotal Europe</i>		<i>57</i>	<i>78</i>	<i>48</i>
USA	Montana	1	13	0
	Idaho	1	14	0
<i>Subtotal USA</i>		<i>2</i>	<i>27</i>	<i>0</i>
Total		103	144	127

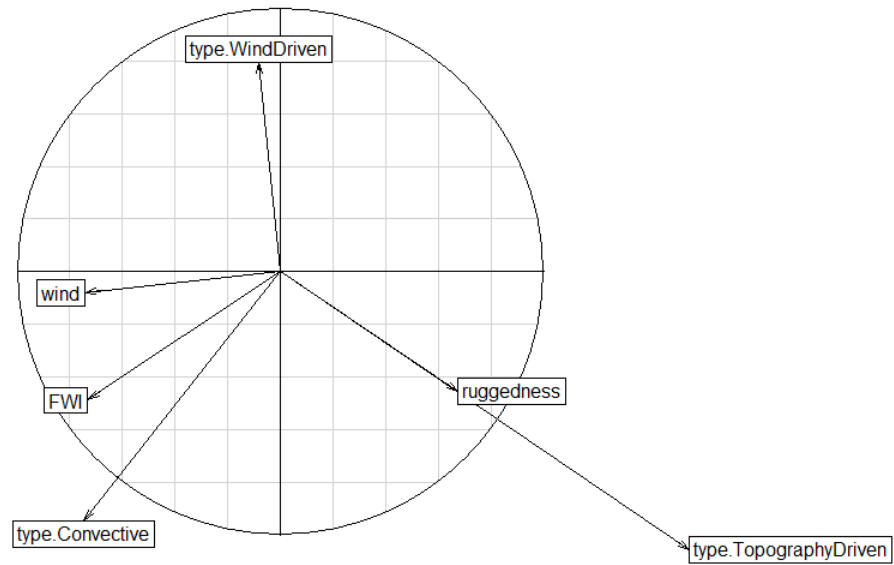


Figure 15. Correlation circle resulting from Principal Component Analysis on weather and terrain descriptors. Wind is the average wind speed and FWI is the Fire Weather Index.

Table 11. Types of fire and their consequences

Fire type	Nb. of Entrapments	Deaths	Injuries
Topography-driven	17	62	29
Wind-driven	57	48	71
Convective	29	34	27

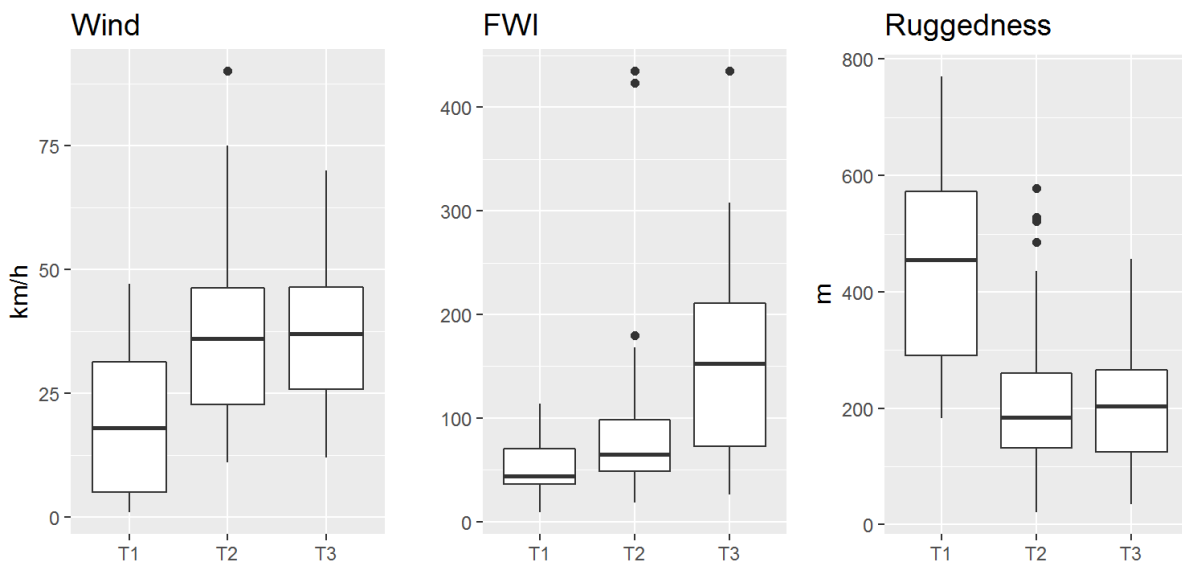


Figure 16. Distribution of weather and terrain descriptors for each type of fire: topography-driven (T1), wind-driven (T2) and convective (T3). Wind is the average wind speed and FWI is the Fire Weather Index.

Conditions conducive to one or more dynamic behaviour configurations were present in 69% of the total entrapments (Table 12) and reached 94% in T1. ‘Shift’ was present in all the types but contributed fewer in T2 than ‘attachment’, ‘canyon’ and ‘VLS’ ($p = 0.006$, $p = 0.002$ and $p < 0.001$ respectively). Attachment and canyon configurations also appeared in all the fire types and greatly contributed to T1. Only one of the T1 cases did not meet attachment conditions. VLS, not implied in T1, was the most frequent of the conditions associated with T2 fires. Figure 17 shows that ‘attachment’ and ‘canyon’ were often present jointly: ‘canyon’ was also present in 76% of ‘attachment’ and ‘attachment’ was also present in 82% of the cases with ‘canyon’. Wind shift alone was implied in 10% of entrapments and VLS alone in 13%. While several configurations were simultaneously present in most T1 entrapments, each configuration was separately associated with some T2 and T3 entrapments.

Table 12. Contribution of dynamic behaviour configurations in each entrapment type
 ‘None’ indicates entrapments where none of the investigated configurations were present. The sums per row are not equal to 100% because of co-contributions

	Shift	Attachment	Canyon	VLS	None
Topography-driven fire	29%	94%	76%	0	6%
Wind-driven fire	10%	32%	35%	42%	30%
Convective fire	38%	24%	17%	24%	48%
Total	21%	40%	37%	30%	31%

For 52% of the 31 cases with VLS conditions, VLS distance was zero, i.e. the entrapment occurred on slopes prone to VLS. The longest VLS distance, 1300 m, was recorded for two cases in T2 and one in T3. However, in 79% of the T2 cases with VLS conditions, VLS distance was ≤ 600 m. It was ≥ 600 m for 86% of the T3 cases with VLS conditions (Fig. 18).

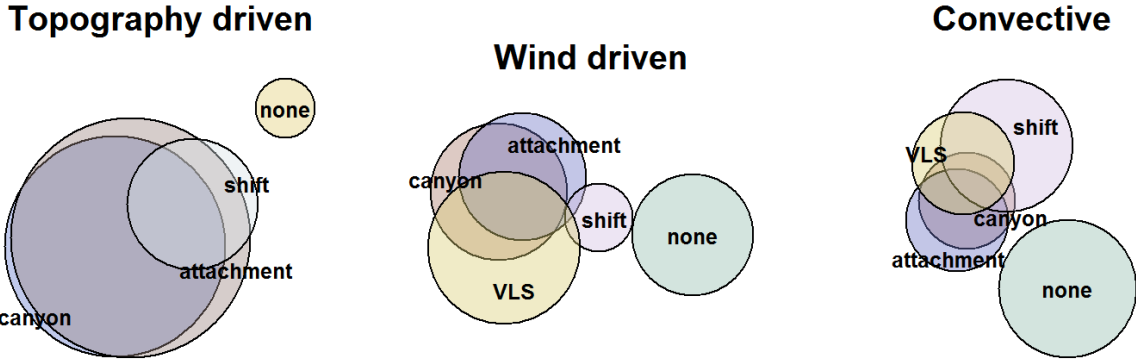


Figure 17. Relations between factors (wind ‘shift’, ‘attachment’ on steep slope, ‘canyon’ configuration and vorticity-driven lateral spread ‘VLS’) associated with entrapment. For each of the three fire types, the area of the circles is proportional to the presence of the factors and the overlapping areas correspond to joint presences. ‘None’ indicates entrapments where none of the investigated configurations were present.

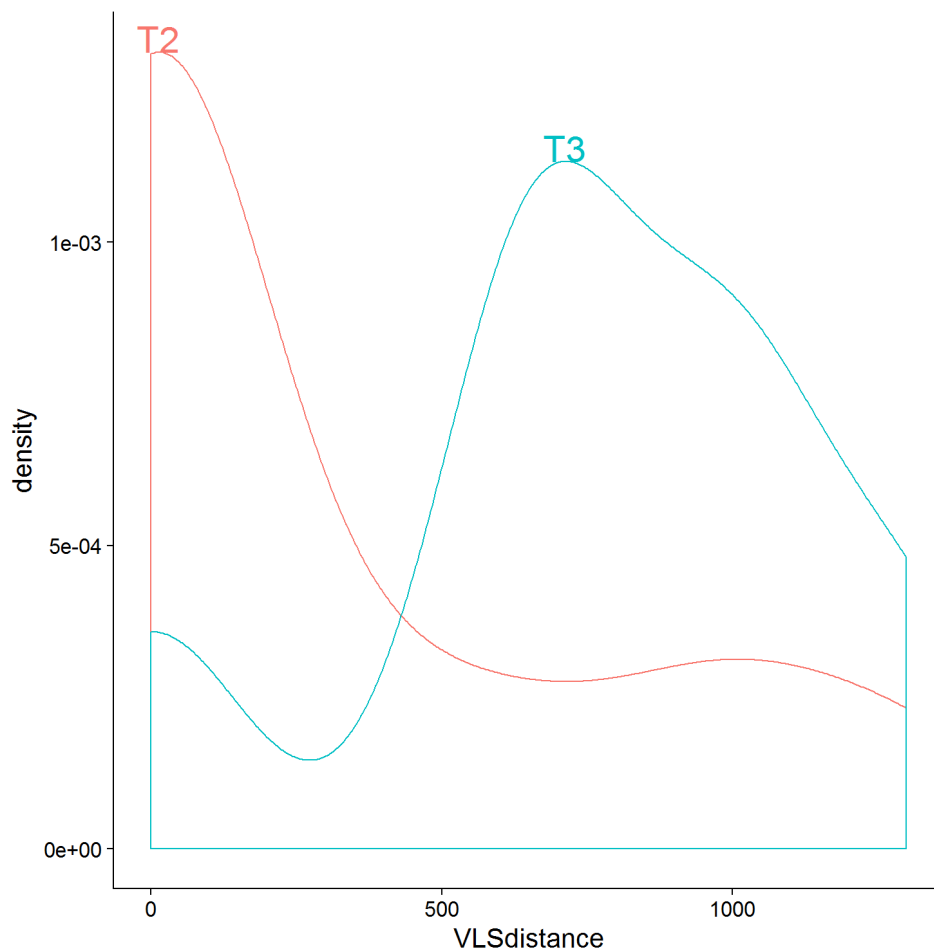


Figure 18. Density of distance between VLS prone slope and entrapment position ('VLS distance') for wind-driven fires (T2) and convective fires (T3).

Discussion

As other studies proposed models for weather and topographic conditions leading to entrapments (Page and Butler 2017; Lahaye, Sharples, *et al.* 2018), this work is the first to investigate the terrain arrangement around the entrapments and to identify the potential contribution of different dynamic fire behaviours in such a wide set of entrapments on several continents. It reveals that the potential contribution of wind shifts, flame attachment on steep slopes and in canyons, and VLS occurrence differs from one type of fire to another. A single fire can exhibit several types during its spread, particularly in the case of long lasting fires. The method used here focused on the fire type around the entrapment time and location. Although Duane *et al.* (2015) did not detail the expert method to establish the classification in Spain, expert fire behaviour analysts classify a fire as topography-driven when the spread is constrained by the air flow along the slopes (Costa *et al.* 2011). The criterion we chose here to characterise topography-driven fires was fully consistent with this description.

Despite investigation of convective versus wind-driven effects influencing the behaviour of fires (Morvan 2010; Werth *et al.* 2016), there is no description in the literature of a reproducible

way to recognise convective fires. Focusing on the rate of growth, we succeeded in distinguishing fires previously established as extreme, such as those of February 2009 in Victoria (McLeod *et al.* 2010), from others notably less violent (Stevenson 2001; Pearce *et al.* 2004). However, the rate of growth was calculated on a time-step up to 8 hours and the method was not able to capture a convective pattern after a period of less violent development. As a result, it is possible that some of the fires we classified as wind-driven were convective at the time of entrapment.

Distinguishing the types of fires in an entrapment risk assessment is useful if the type of fire can be predicted before the fire starts. Our results indicate that we can use a basic combination of terrain and weather indicators to predict the fire behaviour type. Ruggedness on its own produced good results in predicting topography-driven behaviours. The extent of landscape ruggedness described, about 7 km², is wide enough to use this descriptor in an operational mapping tool. The threshold we found, 291 m, is consistent with the value of 300 m proposed by McRae and Sharples (2013) to separate rugged (> 300 m) from undulating (< 300 m) terrain. On rugged terrain with wind under 30 km h⁻¹ (also FWI lower than 70), fire behaviour is highly likely to be driven by topography rather than wind. We did not consider fuel type and load in our assessment despite their role in convective fires (Duane *et al.* 2015). We neither considered drought nor atmosphere instability despite their role in producing extreme fires (Sharples *et al.* 2016). So, it was not possible to fully discriminate the conditions conducive to convective behaviours as distinct from those conducive to wind-driven behaviours. However, FWI around 150 (FFDI > 60 in Australia) appears to be an interesting threshold as values above this lead almost exclusively to convective behaviours. The similar wind speeds in wind-driven and convective fires emphasize that the higher FWI for convective fires were driven by combinations of drought, low humidity (Ellis 2015) and high temperatures (Cardil and Molina 2015) rather than wind.

Most of our data come from France and Australia where the largest fires are wind-driven or convective (Ruffault *et al.* 2016; Lahaye, Sharples, *et al.* 2018). A similar study in North America, also prone to entrapments (Mangan 2007; Alexander and Buxton-Carr 2011), may identify different tendencies. The steep slopes found by Page and Butler (2017) in their study in the United States suggest that many entrapments may have happened during topography-driven fires there.

The overrepresentation of fatalities in topography-driven fires, despite the lower number of cases investigated, suggests that rugged terrain presents the most dangerous conditions for firefighters. One of the critical points is that, in the most rugged terrain, firefighters must operate away from any vehicular shelter (Maclean 1992; Butler *et al.* 1998); emergency escape routes are also more difficult to access.

Cheney *et al.* (2001) provided recommendations on firefighting tactics and egress distances to observe. However, the assumption was that the escalation in fire behaviour was mainly due to changes in wind direction. While Lahaye, Sharples, *et al.* (2018) demonstrated that a change in wind direction is associated with 41% of the entrapments in Australia, we have shown here that other dynamic fire behaviour conditions, namely flame attachment on steep slopes and in canyons and VLS, may contribute more than a change in wind direction in entrapments across the world. The “Dead-Man Zone” (Cheney *et al.* 2001) concept has been disseminated in training and operational materials in Australia (New South Wales Rural Fire Service 2010) as

a safety distance that linearly increases with the Forest Fire Danger Index and with increasing slope. In the United States, the Incident Response Pocket Guide considers that lee-facing slopes are safer than wind-facing slopes (National Wildfire Coordinating Group 2014). However, dynamic fire behaviours break the rules advocated in these tools to determine safety zones.

In topography-driven fires, flame attachment conditions are a common factor of entrapment. Several studies have described how these conditions can dramatically change fire's rate of spread (Van Wagner 1977; Viegas 2006; Edgar *et al.* 2016) so that Viegas (2004) introduced the term 'fire eruption'. In the case of topography-driven fires, any position above a fire line on slopes steeper than 20° must be considered as dangerous. Despite (Viegas and Simeoni 2011) stating that fire eruptions are more likely to happen in canyon configurations, our findings are that a steep slope prone to flame attachment is a sufficient condition for entrapment in topography-driven fires.

In wind-driven fires, entrapments can be caused by changes in wind direction, flame attachment or canyon configurations but the main contributor is VLS prone terrain. It is the most counter-intuitive finding of our study as firefighters usually consider lee-facing slopes as the safest (New South Wales Rural Fire Service 2010; National Wildfire Coordinating Group 2014). The slopes prone to VLS depend on wind direction; tools, such as the maps available from the HighFireRisk website (www.highfirerisk.com.au), can help incident management teams to identify dangerous terrain. Although VLS can lead to entrapments on the slopes generating the phenomenon, it can also produce effects at long distances (Sharples *et al.* 2012). Therefore, we also registered VLS prone slopes hundreds of meters from the entrapment locations. In these cases, however, the influence of VLS prone terrain in the entrapments is only an hypothesis that we could not verify.

In convective fires, all the dynamic fire behaviour conditions investigated appear in some of the entrapments, without any main contributor. This is also the type of fire with the largest proportion of entrapments with no dynamic fire behaviour implied. There could be three reasons for that. Firstly, convective fires propagate with long distance spotting and multiple spread directions (Costa *et al.* 2011) so that entrapping fire spread origin locations may be outside the area investigated here. Secondly, entrapments in convective fires may have been due to other types of dynamic fire behaviours that were not considered in this study, such as that associated with fire coalescence or junction fires (Viegas *et al.* 2012; Hilton *et al.* 2016). Finally, because convective fires develop massive crowning and high intensity firelines, they can also lead to entrapments without any dynamic fire behaviour.

We highlighted larger VLS distance for convective fires than for wind-driven fires; however, Sharples *et al.* (2012) described longer VLS distances than the 1500 m we investigated here.

While this study focused on the conditions of dynamic fire behaviours associated with entrapments, it gives no evidence that these behaviours actually happened and caused the entrapments. Further research could establish this evidence for the most recent fires by investigating satellite images (Jolly and Freeborn 2017) or line-scan data (Sharples *et al.* 2012) and reports with precise descriptions of entrapments.

Conclusion

Conditions conducive to dynamic fire propagation exhibit a clear association with firefighter entrapments and the potential contribution of the various modes of dynamic fire propagation depends on the type of fire.

In topography-driven fires, in rugged terrain with relatively low fire weather index, entrapments happen on upslopes steeper than 20°, areas prone to flame attachment. In wind-driven fires, the main contributor is susceptibility to vorticity-driven lateral fire spread. In convective fires, many configurations can lead to entrapments, including without any obvious dynamic fire behaviour characteristic.

Including these findings in warning procedures has the potential to significantly enhance firefighter safety through provision of more specific information on dangerous conditions and better targeted safety advice.

Acknowledgements

In Australia, the study was jointly funded by the New South Wales Rural Fire Service and the University of New South Wales. The Country Fire Authority of Victoria provided useful reports. In France, several Services Departementaux d'Incendie et de Secours collaborated. We thank the firefighters from Bouches-du-Rhone and from the Reseau National des Praticiens du Brulage for their testimonies.

Discussion

Etudier et classer les feux : un défi relevé

Cette étude s'intéresse aux grands feux de forêt et vise à les classer ainsi qu'à en détailler et expliquer les comportements dangereux afin d'orienter les sapeurs-pompiers vers les méthodes de lutte les plus sécurisées.

Dans un premier temps, nous envisagions d'étudier les actions de lutte menées sur des incendies afin de comprendre dans quelles conditions ces actions sont efficaces, dans quelles conditions elles sont inefficaces et dans quelles conditions elles sont dangereuses pour les intervenants. Considérer la dimension efficacité, en plus de la dangerosité, était vraisemblablement digne d'intérêt. Cependant, les pompiers ne documentent pas précisément les actions réalisées lors d'un feu. En l'absence d'archive, il est actuellement difficile d'analyser l'efficacité des actions.

Pour autant, le rassemblement des données présentées ici est sans précédent. L'enquête a été réalisée dans deux pays essentiellement, la France et l'Australie, puis complétée avec des données d'Espagne, du Portugal, de Grèce, de Croatie, de Nouvelle Zélande et des Etats-Unis. Dans chacun de ces pays, les services d'incendie sont nombreux ; ils possèdent leurs propres archives. Les accidents de pompiers les plus graves y font l'objet d'investigations judiciaires ou d'enquêtes nationales (Coroners Court of Wollongong 1981; Stevenson 2001; Schapel 2007; Ferguson 2016), d'autres ont été analysés dans des publications (Cheney *et al.* 2001; Xanthopoulos 2007; Viegas *et al.* 2009). Mais au-delà, grâce à des contacts auprès de plusieurs services incendie en France, en Australie et en Espagne, j'ai également pu accéder à des rapports et témoignages non publiés ; c'est la matière principale de cette étude.

On peut d'ailleurs noter plusieurs raisons pour lesquelles les rapports d'accidents ne sont pas librement accessibles :

- i. Il n'existe pas de procédure interservices standardisée de collecte de données ;
- ii. Les bureaux 'hygiène et sécurité', chargés d'enquêter sur les risques professionnels, sont apparus récemment, et ne sont pas encore dotés des moyens nécessaires dans tous les services. Il en va de même pour les bureaux 'qualité' ou 'retours d'expérience' ;
- iii. S'agissant d'accidents professionnels, les services sont peu enclins à diffuser des informations qui pourraient mettre en cause leur responsabilité.

Alors que de nombreux rapports et témoignages concernant les accidents et le comportement du feu ont ici été étudiés, l'information trouvée est très hétérogène. Les rapports d'investigation judiciaire, souvent très documentés, font une large place aux circonstances entourant l'accident (description du matériel, des personnels, de la formation, du commandement...) et à l'enchaînement des événements. Ainsi, il a été fastidieux d'y repérer les éléments clés intéressants cette étude. Les récits publiés dans des revues (Bush Fire Council of NSW and NSW Rural Fire Service 1978), journaux (Herald and Weekly Times 1983; The Age and The Advertiser 1983) ou ouvrages (Baxter 1984; O'Connor and O'Connor 1993; Collins 2006) s'attachent à décrire le contexte émotionnel en omettant parfois des éléments factuels

(localisation de l'accident, horaire...) nécessaires dans le cas de cette étude. Les rapports d'accidents mandatés et instruits par les services 'hygiène et sécurité', ou 'qualité', ciblent généralement des thématiques telles que l'organisation, la formation du personnel ou l'équipement. En ce sens, le comportement du feu, son évolution ou les conditions météorologiques sont rarement décrits aussi précisément que souhaité pour les besoins de cette étude. Les témoignages oraux, de leurs côtés, peuvent être plus ou moins pertinents et précis, en fonction du délai depuis l'accident, du niveau d'implication de l'interlocuteur dans l'événement et de sa qualification pour évaluer le comportement du feu. Aussi, certains témoignages à la pertinence douteuse ou à la précision insuffisante ont dû être écartés.

Mes contacts avec les services incendie ont rendu possible l'accès aux rapports internes d'accidents. De la même façon, ont été collectées des données environnementales non publiées, telles que des données météorologiques en France (obtenues auprès de Météo France) ou des données cartographiques concernant les contours de feux en France (obtenues auprès de l'Office National des Forêts) et en Australie, dans le New South Wales, (obtenues auprès du New South Wales Rural Fire Service). Il faut également noter que Météo France dispose d'une 'antenne feux de forêts' dotée d'une expertise conséquente sur les indicateurs de risque, mais que, en dépit d'une influence certaine sur la stratégie de lutte en France, il a été difficile d'y faire référence en l'absence de publications sur le sujet.

Par ailleurs, il semblait intéressant d'adopter la classification des feux proposée par Costa *et al.* (2011) en phase initiale de cette étude. Nous avons ainsi d'abord tenté de classer les grands feux répertoriés en France suivant l'approche catalane. Cependant, cette démarche s'est heurtée à l'absence de critère de classification publié. La méthode suggérée par Costa *et al.* (2011), et reprise entre-temps par Duane *et al.* (2015), s'appuie sur un travail d'expertise que les techniciens du Catalan Fire Service mènent depuis plusieurs années pendant les incendies (Otero and Nielsen 2017). En l'absence de cette compétence pour évaluer les feux passés en France ou en Australie, nous avons opté pour une autre méthode, sans dire d'experts et la plus objective possible. Dans les deux premiers chapitres de cette thèse, nous avons ainsi cherché les conditions environnementales qui génèrent les feux dangereux en France (chapitre 1) et les accidents de pompiers en Australie (chapitre 2). Après avoir réuni tous les accidents dont je disposais en une seule et unique base de données, nous avons opté dans le troisième chapitre pour une méthode d'analyse sensiblement différente. Nous y avons étudié le comportement du feu autour des sites d'accidents, compte tenue de l'interaction entre les éléments météorologiques et le relief. Cette analyse a permis de déterminer trois catégories d'incendies :

- i. Les feux influencés par la topographie, en milieu montagneux où l'indice de rugosité, soit la différence d'altitude entre le point le plus élevé et le point le moins élevé dans un rayon de 1,5 km (McRae 1992), est supérieur à 300 m ;
- ii. Les feux convectifs, lorsque le Fire Weather Index (Van Wagner 1987), appelé Indice Forêt Météo en France, est supérieur à 150 ; c'est-à-dire lors de combinaisons extrêmes de sécheresse, vent fort, température importante et humidité faible ;
- iii. Les feux guidés par le vent, dans les autres cas, qui sont les plus fréquents.

In fine, ces trois catégories correspondent aux principales catégories définies par Costa *et al.* (2011), pour lesquelles, pour la première fois, des critères seuils sont ici proposés.

A l'avenir, la mise en place de procédures homogènes de recueil de données lors des incendies, la diffusion et publication de ces données ainsi que le développement de compétences d'analyse

et de classification des feux au sein des services d'incendie pourraient permettre de disposer d'un jeu d'informations beaucoup plus complet. Alors que cette étude a nécessité plusieurs années pour réunir et traiter les données liées à 103 accidents, on peut imaginer l'intérêt de jeux de données concernant le comportement de plusieurs milliers d'incendies à travers le monde.

Variabilité intercontinentale

Cette étude commence, dans le premier chapitre, en étudiant les feux dangereux en France. Trois critères ont été retenus pour évaluer la dangerosité des incendies :

- i. La surface finale parcourue, compte tenu de la dispersion des moyens et des difficultés de coordination que posent les incendies les plus étendus ;
- ii. Le rythme d'extension en surface, car les feux rapides ne laissent pas le temps aux pompiers de se repositionner ;
- iii. La survenue d'un accident, c'est-à-dire des pompiers piégés par le feu.

Nous avons utilisé des méthodes de régression quantile, comme l'ont fait également Fernandes *et al.* (2016) au Portugal, pour mettre en valeur les caractéristiques de ces feux dangereux parmi 808 feux au total. Compte tenu du grand nombre d'incendies étudiés, les résultats ont pu être affinés à l'échelle régionale en France, sur la base des pyrorégions définies par Frejaville and Curt (2015). Par ailleurs, les critères liés à la topographie et au couvert végétal, initialement supposés essentiels, sont apparus secondaires à la lumière des régressions quantiles ; c'est pourquoi l'analyse s'est restreinte aux données météorologiques.

Le deuxième chapitre, consacré à l'Australie, est focalisé sur les feux qui ont piégé les pompiers ; ces feux y sont comparés à d'autres feux similaires sans accident. Là, nous avons pu appréhender les éléments météorologiques d'une part, mais aussi des critères topographiques (pente et rugosité). En ce qui concerne le couvert végétal, il faut noter que les forêts australiennes sont très majoritairement composées d'Eucalyptus. En dehors des forêts, on trouve de vastes étendues de prairies, pâturées ou non. La communauté scientifique et opérationnelle distingue généralement là-bas trois types de feux selon le couvert : forestier, broussailleux ou herbacé (Cruz *et al.* 2015). Nous avons repris cette classification.

En France Méditerranéenne, les vents forts, tels que Mistral ou Tramontane, influencent largement le régime d'incendies (Ruffault *et al.* 2016). Aussi les services de lutte contre l'incendie établissent souvent un lien intuitif entre force du vent et risque. Le premier chapitre du doctorat montre que le vent fort est en effet le principal facteur conduisant à des grands feux ou à piéger les pompiers en France. Cependant, il met également en lumière que les températures élevées donnent lieu à des incendies qui se propagent rapidement. Il montre enfin que, dans certaines régions, les feux les plus étendus sont provoqués par les températures élevées, et que, dans d'autres régions, la sécheresse profonde est un autre facteur fortement déterminant de la taille des grands incendies. Alors que d'autres études ont entre-temps montré des résultats similaires dans plusieurs pays méditerranéens (Cardil *et al.* 2014; Diakakis *et al.* 2016; Fernandes, Barros, *et al.* 2016), c'est la première fois que de tels résultats sont mis en avant en France.

En Australie, la rencontre de masses d'air désertique chaud et sec avec des masses d'air océanique humide donne lieu à des fronts météorologiques dépressionnaires. Ces fronts se déplacent sur de grandes distances sans trouver de relief marqué. Au passage des fronts, les

vents forts peuvent changer de direction violemment. Ces changements modifient largement le comportement des incendies (Luke and McArthur 1978) et causent des dégâts considérables (Cruz *et al.* 2012). Ils sont suspectés d'être la principale cause d'accidents pour les pompiers (Cheney *et al.* 2001). Nous avons confirmé cette hypothèse dans le deuxième chapitre de cette étude, après comparaison de 45 feux ayant causé des accidents avec des feux sans accident. Cependant, ce chapitre montre que d'autres facteurs contribuent également au risque d'accident, notamment l'interaction entre vent fort et topographie marquée par des pentes fortes.

Par ailleurs, basé sur l'étude de 103 accidents sur plusieurs continents, le troisième chapitre montre que le changement de direction du vent n'est pas le facteur le plus significatif à l'échelle mondiale. Le changement soudain de direction du vent est un danger majeur qui prédomine essentiellement en Australie, et non en Europe. Il faut noter que le nombre limité d'accidents étudiés ici sur le continent Américain ne permet pas de tirer de conclusions concernant cette partie du monde.

Quelles que soient les spécificités locales qui marquent le régime de vent au sol (Mistral et Tramontane en France, passage de fronts dépressionnaires en Australie), il est également nécessaire d'appréhender le contexte météorologique dans sa totalité autour de l'incendie pour en évaluer la dangerosité. Ainsi, cette étude montre, à la fois pour la France et pour l'Australie, que le risque varie en fonction de l'arrangement des différents composants des indicateurs météorologiques du risque : sécheresse, vent, humidité et température. Au-delà, Potter (2002) et Mills (2005) ont détaillé comment l'instabilité atmosphérique modifie et amplifie le développement du feu. Le deuxième chapitre présenté ici montre, de son côté, qu'un air instable peut également augmenter le risque d'accident pour les pompiers. Ni le Fire Weather Index (FWI) (Van Wagner 1987), utilisé en Europe, ni le Forest Fire Danger Index (FFDI), utilisé en Australie (McArthur 1967), ne reflètent ce critère d'instabilité atmosphérique. Par conséquent, afin d'anticiper au mieux les comportements du feu dangereux, les pompiers ne peuvent s'en remettre aux seuls indices de risque que sont le FWI ou le FFDI ; ils doivent développer des compétences en météorologie, leur permettant de comprendre l'interaction entre les phénomènes atmosphériques et le comportement du feu.

En dehors des paramètres environnementaux que sont la météorologie ou la topographie, on ne peut s'intéresser à la variabilité régionale des accidents des pompiers sans évoquer l'organisation locale des services d'incendie et de secours : quantité de moyens humains et matériels engagés dans la lutte, stratégie, types de véhicules et d'équipements... En France, la stratégie d'attaque massive et systématique des dépôts de feux, mise en œuvre depuis les années 1980 (Battesti 1997), a longtemps été considérée par les décideurs politiques et pompiers comme idéale. Cette stratégie a en effet permis de réduire largement le nombre d'incendies (Turco *et al.* 2016). Pour autant, nous avons listé ici nombre d'accidents graves qui se sont produits dans la même période. Sans remettre en cause la stratégie, il semble dès lors judicieux d'envisager des adaptations au bénéfice de la sécurité des intervenants.

En Australie, comme indiqué dans le deuxième chapitre, le nombre de pompiers mortellement blessés a diminué au cours des trente dernières années alors que le nombre d'accident n'a pas diminué. Nous avons attribué cela à l'évolution des matériels et procédures : meilleure formation, véhicules mieux protégés, tenues de protection individuelles plus appropriées (Legislative Council 2000; Cruz *et al.* 2016). En France, et plus généralement en Europe, la

technicité et l'équipement des pompiers se sont améliorés de la même manière. Au fil des accidents, les pompiers français ont même intégré les équipements les plus performants pour protéger l'habitacle de leurs véhicules avec notamment des systèmes d'aspersion d'eau, d'air pressurisé et des vitres filmées (http://www.sdis13.fr/haut/menu_principal/le_sdis13/materiels/vehicules_feux_espaces_naturels/camion_citerne_feux_foret_moyen, consulté le 18/04/2018). On peut donc raisonnablement admettre que l'évolution du matériel a été similaire en France et en Australie ces trois dernières décennies et que les répercussions sont également similaires: moins de décès en dépit d'un nombre d'accidents qui ne diminue pas. Au-delà de l'évolution du matériel, on peut noter certaines différences dans la stratégie et la formation entre les deux continents. Du côté français, l'accent a largement été mis sur l'organisation et les communications (organisation des fréquences radio, formatage des informations) ainsi que sur la formation, ciblée pour donner des automatismes en fonction des situations, par exemple : protéger une habitation, se replier dans son véhicule... (Direction de la Sécurité Civile 2009). Du côté australien, certains états, notamment le New South Wales, se sont dotés de moyens considérables pour analyser, comprendre et anticiper le comportement des incendies : financements de recherches, formation d'analystes du comportement du feu, acquisition d'outils météorologiques portatifs, développement d'outils numériques. Dans la continuité de projets tels que Geosafe (https://cordis.europa.eu/project/rcn/199945_fr.html, consulté le 18/04/2018), il est souhaitable de développer les échanges intercontinentaux entre services incendie afin de créer des synergies et de partager les solutions élaborées les plus performantes.

Des comportements du feu dangereux aux accidents

Tout au long de ce doctorat, je me suis heurté à des définitions hétérogènes des concepts et des termes. Tedim *et al.* (2018) ont d'ailleurs analysé les différentes terminologies employées dans la littérature concernant la taille des incendies et montré que les seuils employés pour désigner un « grand feu » et un « très grand feu » sont extrêmement variables selon les pays et les études. Le premier chapitre du doctorat a porté une attention particulière aux incendies de plus de 200 ha, essentiellement en raison de leur nombre en France. Ils sont suffisamment nombreux pour constituer une base de données statistiquement intéressante et suffisamment rares pour être référencés dans les archives et les mémoires.

Concernant la terminologie encore, alors que des publications ont détaillé comment la combinaison de facteurs topographiques et météorologiques génère des feux extrêmes (McRae and Sharples 2013; Sharples *et al.* 2016), Tedim *et al.* (2018) ont proposé une définition holistique des feux extrêmes. Cette définition intègre à la fois des éléments de comportement du feu mais également les conséquences eu égard à la difficulté de la lutte. Cependant, les critères retenus ne mentionnent pas le taux d'extension de la surface incendiée, en ha h^{-1} , que nous avons pourtant étudié tout au long des travaux présentés ici. Le taux d'extension de la surface est en effet accessible dès lors qu'on a reconstitué les lignes isochrones du développement de l'incendie. Il intègre à la fois le développement axial du front de feu, variable souvent utilisée dans d'autres études, et la vitesse d'élargissement des flancs, généralement omise dans les autres études. Le taux d'extension de la surface donne ainsi une indication intéressante sur la virulence de l'incendie dans sa globalité. Nous avons donc proposé, dès le début des recherches (Lahaye *et al.* 2014), d'utiliser cet indicateur pour discriminer les feux à développement rapide. A posteriori et par extension, nous suggérons de l'utiliser pour

compléter la classification des feux proposée par Costa *et al.* (2011) et pour distinguer les feux convectifs de ceux qui sont guidés par le vent. Il est à noter par ailleurs qu'il n'a jamais été fait référence ici à des variables telles que la hauteur de flamme ou l'intensité du front de feu. Ces variables, parfaitement descriptives de la virulence de l'incendie à l'endroit où elles sont collectées, ne sont généralement pas disponibles dans les rapports et les mémoires. Des données conséquentes vont cependant pouvoir à l'avenir être extraites grâce aux moyens modernes d'observation : satellites, drones, images aériennes géo référencées... Il reste à organiser le dépôt de ces données dans des bases accessibles à la communauté scientifique.

La définition des « grands feux » ou des « feux extrêmes » n'est donc pas universelle ; de la même façon, les termes décrivant les comportements du feu ne font pas tous consensus. En évoquant un « comportement extrême », on peut supposer qu'il s'agit d'un comportement « extrêmement dangereux » ; mais d'aucuns assimilent « extrême » à « exceptionnel », donc « rare ». Aussi, j'ai préféré parler ici de « comportement dynamique ». On peut évidemment critiquer ce choix et rappeler qu'un incendie est toujours dynamique ; cependant, cette terminologie permet de dissocier un « comportement dynamique » des « feux extrêmes » et souligner ainsi que ces comportements dangereux peuvent aussi se produire lors de feux moins importants.

Dans l'emploi des mots, il est également parfois difficile de dissocier la cause de la conséquence. Ainsi, lorsque les changements de direction du vent ont été évoqués, il s'agissait de conditions entraînant un comportement du feu dynamique. A l'inverse, l'attachement de la flamme est bien un comportement dynamique qui se produit sur les pentes raides ; la propagation latérale guidée par l'effet vortex (VLS) est un autre comportement dynamique. Concernant l'effet tranchée, ou canyon, alors qu'il s'agit à priori d'une configuration de terrain susceptible de provoquer un comportement dynamique, le terme est généralement accepté comme un comportement particulier du feu (Viegas and Simeoni 2011). Afin de s'affranchir de ces subtilités linguistiques, les phénomènes sont ici regroupés sous le vocable de configurations propices à un « comportement du feu dynamique », c'est-à-dire un développement du feu dans une direction et/ou à une vitesse inattendues si l'on suit les modèles linéaires de propagation.

Météorologie, topographie et végétation sont les trois composantes qui modèlent le comportement d'un incendie. Le premier chapitre de l'étude, après quelques analyses préliminaires ayant écarté le type de couvert végétal, s'intéresse essentiellement aux facteurs météorologiques, déterminants dans l'analyse des feux en France. Le rôle de la topographie est évoqué dans le deuxième chapitre et devient, en interaction avec les conditions météorologiques, le point focal du troisième chapitre et de notre compréhension des comportements de feux dangereux. L'indice de rugosité du terrain est un indicateur largement utilisé dans ces travaux pour appréhender la topographie. Cet indice, proposé par McRae (1992), représente la différence d'altitude entre le point le plus élevé et le point le moins élevé dans un rayon de 1,5 km. Il est facilement accessible avec un outil d'information géographique et s'exprime par une valeur, en mètres. McRae and Sharples (2013) ont proposé les seuils suivants :

- i. <150 m, terrain plat ;
- ii. 150 à 300 m, collines ;
- iii. 300 m, montagnes.

Cependant, ces seuils peuvent varier selon la résolution du modèle numérique de terrain (DEM en anglais). Avec les DEM 30 utilisés ici, le seuil entre terrain plat et colline doit être ramené entre 50 et 100 m pour évaluer le risque d'accident en Australie (deuxième chapitre). En revanche, le troisième chapitre confirme que le seuil de 300 m est judicieux pour dissocier les terrains de montagnes, propices aux feux topographiques, des autres terrains, moins propices à ce type de feux.

Il est généralement admis qu'en terrain accidenté, le feu est susceptible de développer des comportements dangereux. Cependant, selon les auteurs, l'accent a été mis sur des mécanismes différents. Certains ont insisté sur les emballements, qualifiés d'éruptions, dans les pentes positives ou les canyons (Viegas and Simeoni 2011; Chatelon *et al.* 2014; Edgar *et al.* 2016). D'autres se sont intéressés aux phénomènes générés par les pentes sous le vent, ou VLS (Sharples *et al.* 2012; Simpson *et al.* 2013). Enfin, un champ de recherche s'est développé sur l'explosion de composés organiques volatiles distillés par les végétaux surchauffés et accumulés dans les cuvettes (Carbonell *et al.* 2004; Chetehouna *et al.* 2009).

Ici, nous n'avons pas cherché à identifier si les accidents pouvaient être causés par ces explosions, appelées embrasements généralisés éclairés. Répondre à cette question nécessite en effet de faire appel à des disciplines telles que la thermochimie (mécanisme de l'embrasement) ou la biochimie (émission des composés organiques en fonction des végétaux). Cette étude s'est concentrée sur les conditions météorologiques et topographiques donnant lieu aux phénomènes dangereux, et non sur les mécanismes donnant lieu à ces phénomènes. La compréhension des mécanismes n'est évidemment pas dénuée d'intérêt ; pour autant, dans un intérêt opérationnel pour les pompiers, il a paru primordial de déterminer où et quand les accidents peuvent se produire, plutôt que les mécanismes y conduisant. Cette démarche peut permettre plus facilement aux pompiers de mettre en place des consignes opérationnelles pour limiter leur exposition au risque.

In fine, quatre configurations particulièrement propices à des comportements du feu dangereux ont été retenues:

- i. Les changements de direction du vent ;
- ii. Les pentes ascendantes $> 20^\circ$, propices à l'attachement de la flamme ;
- iii. Les canyons ;
- iv. Les pentes sous le vent $> 20^\circ$, par vent $> 20 \text{ km h}^{-1}$, conditions propices à VLS.

Nous avons déterminé qu'en fonction du type de feu, topographique, guidé par le vent ou convectif, certaines configurations propices aux accidents prédominent. Lors des feux topographiques, la plupart des accidents se sont produits sur des pentes ascendantes supérieures à 20° , propices à l'attachement de la flamme. Lors des feux guidés par le vent, alors qu'on peut trouver les différentes configurations dangereuses, de nombreux accidents se sont produits avec des configurations propices à VLS. Lors des feux convectifs enfin, les accidents peuvent se produire en l'absence de toute configuration particulièrement dangereuse ou à grande distance de celles-ci.

Transposer l'expertise pour les pompiers

Au cours de l'étude, des situations et configurations particulièrement dangereuses pour les pompiers ont été identifiées : vents les plus forts, bascules de vent, sécheresse extrême associée

à des conditions d'instabilité, pentes propices à l'attachement de la flamme ou propices à VLS. Pour profiter pleinement de ces résultats, les tester et valider au fur et à mesure des futurs incendies, et limiter l'exposition des pompiers aux situations dangereuses, les services incendie doivent intégrer ces situations et configurations à différents stades de leur organisation : avant l'incendie (prévention, formation, anticipation), pendant (organisation opérationnelle), et après (retour d'expérience) (Figure 19).

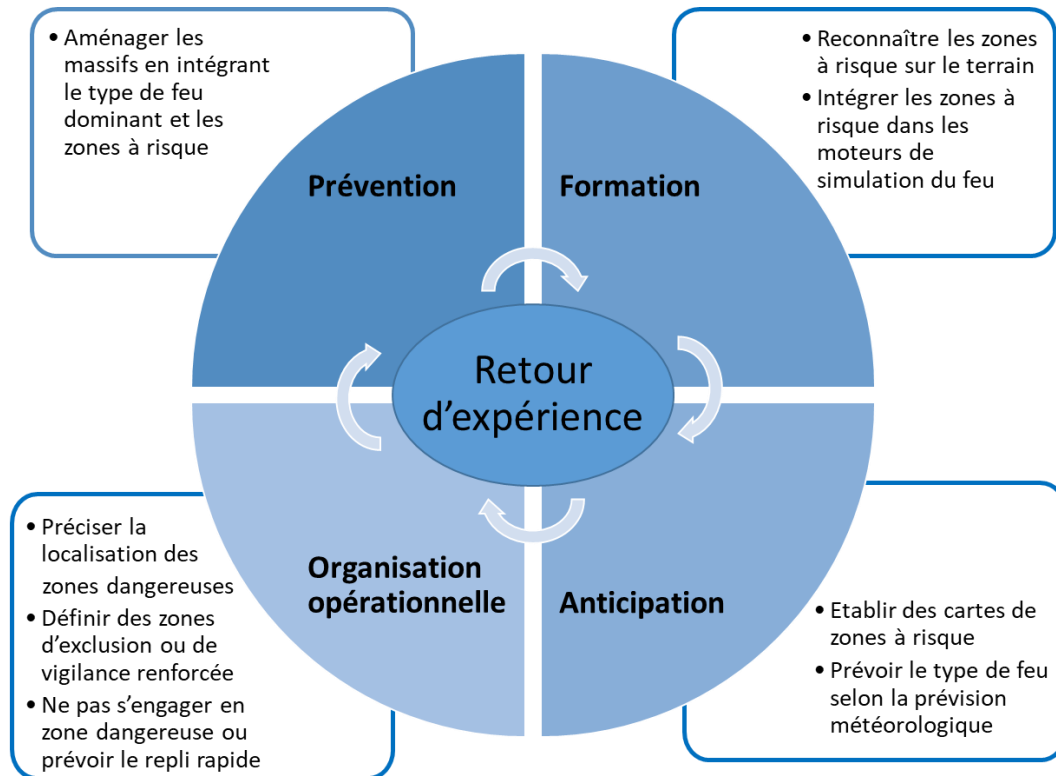


Figure 19. Conceptualisation des améliorations à apporter à l'organisation actuelle des services incendie pour intégrer les situations et configurations dangereuses mises en évidence dans cette étude. Le retour d'expérience, ajouté ici en position centrale, devrait favorablement alimenter tous les stades.

Prévention

Bien en amont des incendies, les espaces sensibles au feu peuvent être aménagés pour faciliter l'intervention des pompiers (Direction de la Sécurité Civile 1994). Les aménagements sont réalisés à partir d'analyses expertes ou avec l'aide d'outils de dimensionnement (Bisgambiglia *et al.* 2017). Ces outils gagneront à intégrer les configurations identifiées ici comme dangereuses : pentes propices à l'attachement de la flamme, à VLS... Il faut noter par ailleurs que, pour proposer les aménagements adéquats, les plans et outils évoqués ci-dessus doivent également tenir compte des types de feu affectant le territoire (Costa *et al.* 2011). Cet aspect va au-delà du cadre d'étude de ce doctorat et nécessite un travail local d'analyse du comportement

des feux passés sur le territoire, notamment en travaillant à l'échelle des massifs, plus fine que l'échelle des pyrorégions.

Formation

La formation des intervenants est un élément déterminant pour leur sécurité. En France, des efforts importants y ont été consacrés ces dernières décennies (Direction de la Sécurité Civile 2009). Les pompiers suivent des modules de formation qui les placent en situation opérationnelle, en fonction de leur niveau de responsabilité. Ils répètent ainsi les gestes et prennent les décisions pour faire face aux situations proposées. Les premiers modules, dénommés 'équipier' et 'chef d'agrès', se déroulent sur le terrain. Pour les modules suivants en France, 'chef de groupe', 'chef de colonne' et 'chef de site', les personnels formés sont connectés en réalité virtuelle à un simulateur vidéo avec lequel ils interagissent. Le système propage automatiquement l'incendie en fonction du terrain et de paramètres météorologiques préprogrammés.

Compte tenu des résultats de notre étude, il est suggéré que, pour les modules effectués sur le terrain, les pompiers apprennent désormais à reconnaître les configurations particulièrement dangereuses, en fonction de la situation météorologique : pentes montantes propices à l'attachement de la flamme, pentes descendantes propice à VLS. Pour ce qui est des simulateurs vidéo, il faut intégrer les configurations propices aux comportements dynamiques en fonction des données météorologiques dans les moteurs de propagation du feu. Cela permettra aux cadres (chefs de groupe, chefs de colonne et chefs de site) d'observer ces comportements dynamiques en réalité virtuelle et d'identifier les localisations dangereuses afin de ne pas y engager leurs équipes.

Enfin, il faut former des spécialistes, les analystes du comportement du feu, là où il y en a actuellement peu, en Europe notamment. En Amérique du Nord, la fonction d'analyste existe depuis plusieurs décennies ; en Australie, elle a pris un essor particulier depuis la fin des années 2000 (Gibos *et al.* 2014). S'il n'existe pas de norme internationale, on constate dans ces régions que les échanges entre analystes de différents états se multiplient : formations communes (<https://www.nwgc.gov/fban-fire-behavior-analyst>, consulté le 09/04/2018), séminaires de travail... Si bien que beaucoup peuvent aujourd'hui s'insérer dans une équipe de commandement et venir renforcer un état ou un pays étranger. En Europe, le service incendie de Catalogne et la Fondation Pau Costa, tous deux en Espagne, ont développé une expertise dans le domaine (Otero and Nielsen 2017) et disséminé leur savoir-faire auprès d'autres services incendie intéressés au Portugal, en Espagne, en France et au Royaume-Uni notamment. Ce réseau, encore informel, devrait se structurer avec l'aide de plusieurs projets européens (<http://netriskwork.ctfc.cat>, <http://fire-in.eu>, consultés le 16/04/2018).

Les analystes doivent également assurer une veille scientifique afin d'intégrer les connaissances développées par des travaux tels que ceux menés ici. Au-delà des compétences forestières, la formation doit donc leur apporter des compétences dans les disciplines connexes au comportement du feu : météorologie, dynamique des fluides, thermodynamique,... La maîtrise de l'Anglais est par ailleurs nécessaire pour accéder aux publications.

Anticipation

Il est possible de créer des outils pour identifier les configurations dangereuses avant que le feu démarre. Ainsi des cartes des zones à risques de VLS ou d'attachement de la flamme en fonction

de la situation météorologique peuvent être établies en amont. Cette démarche est déjà mise en application dans les régions sud-est de l'Australie (<https://www.highfirerisk.com.au>, consulté le 16/04/2018).

A l'approche d'une journée propice aux incendies, et en fonction de la prévision météorologique, les analystes peuvent déterminer le type d'incendie susceptible de se développer sur le territoire : guidé par le vent, topographique ou convectif. Par conséquent, ils peuvent informer les pompiers des comportements du feu prévisibles et de la localisation des zones de danger.

Organisation opérationnelle

En phase opérationnelle, c'est-à-dire lorsqu'un incendie a démarré, les pompiers gagneront en sécurité, mais aussi en efficacité, à mieux intégrer le comportement du feu dans le processus décisionnel, aujourd'hui largement orienté par les enjeux à défendre et les moyens disponibles pour ce faire. Ainsi, l'identification des zones dangereuses ne doit plus reposer sur la seule connaissance empirique des pompiers sur le terrain mais doit être partagée entre différents niveaux de responsabilité. Un analyste, doté de cartes des zones à risque et d'outils de simulation de développement du feu, peut préciser la position des zones dangereuses. Pour cela, il doit être positionné au poste de commandement, avec des interlocuteurs en relais sur le terrain afin de donner à l'analyste une information actualisée sur le comportement et la position précise de la ligne de feu et des sautes de feu. C'est le concept opérationnel développé par le *Grup de Recolzament d'Actuacions Forestals* (GRAF) du service incendie de Catalogne (Otero and Nielsen 2017).

De leur côté, les cadres de la chaîne de commandement (chefs de colonne et chefs de site notamment), préalablement sensibilisés et formés, doivent adapter l'engagement du personnel selon les préconisations des analystes. Ainsi, en présence d'un feu guidé par le vent, ils doivent établir des zones d'exclusion ou de vigilance renforcée dans les secteurs propices à VLS. En présence d'un feu convectif, ils doivent étendre très largement ces zones d'exclusion ou de vigilance renforcée.

Les intervenants sur le terrain, enfin, doivent rester vigilants. Ils doivent par exemple s'abstenir de s'engager par-dessus une ligne d'incendie, ou une saute de feu, sur une pente supérieure à 20°, afin de ne pas s'exposer à l'attachement de la flamme. Ils doivent également se préparer à un retour rapide vers une zone sécurisée (Page and Butler 2017), comme les consignes le rappellent aux pompiers nord-américains (National Wildfire Coordinating Group 2014).

Retour d'expérience

Les développements et comportements des incendies doivent être relevés selon une méthodologie commune aux services d'incendie. Au-delà des informations généralement collectées jusqu'à maintenant : date et heure d'éclosion, surface parcourue, contour final..., il est nécessaire de relever les données suivantes :

- i. Evolution des données météorologiques (vent, température, hygrométrie et stabilité atmosphérique), tout au long du développement de l'incendie ;
- ii. Couvert végétal (type d'essence, hauteur et densité) sur la surface incendiée et en périphérie ;
- iii. Evolution du contour de feu sous forme d'isochrones ;

- iv. Informations sur l'évolution du comportement du feu, voire de sa virulence: hauteur de flammes, distance des sautes de feu ;
- v. Actions de lutte effectuées et difficultés rencontrées, à savoir adéquation entre les moyens de lutte et la virulence du feu.

A ce jour, certaines informations ne peuvent être collectées que dans les rapports des services d'incendie ou par le biais d'interview d'intervenants sur le terrain. Cependant, la généralisation des moyens automatiques de surveillance et de détection devraient à terme permettre d'obtenir une grande partie des informations listées ci-dessus. En effet les services d'incendie ou leurs partenaires s'équipent aujourd'hui de drones, de caméras et capteurs dans le spectre visible, infra-rouge ou thermique afin de disposer en temps réel des remontées d'informations nécessaires. Ces informations sont par ailleurs enregistrées. Il reste à organiser le partage de ces informations, qui doivent être consignées dans une base de données internationale accessible aux analystes afin d'augmenter et d'actualiser les connaissances.

Conclusion

Nous avons déterminé les conditions météorologiques propices aux incendies de forêt dangereux et aux accidents de sapeurs-pompiers en France et en Australie. Nous avons ensuite identifié les configurations propices à des comportements du feu dynamiques susceptibles de piéger les pompiers, selon le type d'incendie et quel que soit le continent.

Cette étude a, pour la première fois, analysé des données éparpillées dans les archives de services dans plusieurs pays et sur plusieurs continents. La formalisation du recueil de données et le partage des informations entre services et avec la communauté scientifique devraient permettre de prolonger le travail. Par ailleurs, les pompiers ont ici les éléments pour intégrer les résultats de cette étude à différents stades de leur organisation, dans un objectif d'amélioration de la sécurité des intervenants de terrain.

Cela passe notamment par la formation et la mise en place d'analystes du feu, experts scientifiques du comportement des incendies. En l'absence de standard international, cette fonction d'analyste s'est développée et a évolué de façon différente aux Etats-Unis ou en Australie depuis plusieurs années. En Europe, quelques expériences ont vu le jour, en Espagne notamment, mais ces initiatives restent embryonnaires à l'échelle du continent compte-tenu du défi qu'y représente l'évolution actuelle et à venir des incendies. La France, dotée de solides structures opérationnelles et de formation des pompiers, peut aisément franchir le pas, intégrer les résultats présentés ici dans les formations et mettre en place des fonctions d'analystes dans les services d'incendie et de secours.

Si ce pas est effectué, ce doctorat aura initié le rapprochement nécessaire entre science et lutte opérationnelle contre les feux de forêt.

Références bibliographiques

- Alexander ME (2000) The Mann Gulch Fire and the Canadian Forest Fire Danger Rating System. In '3rd Symposium on Fire and Forest Meteorology,' Boston, Massachusetts, USA. 97–98. (American Meteorological Society: Boston, Massachusetts, USA)
- Alexander ME, Buxton-Carr P (2011) Wildland fire suppression related fatalities in Canada, 1941-2010: a preliminary report. In Fox RL (ed) '11th International Wildland Fire Safety Summit', Missoula, MT, USA. (International Association of Wildland Fire: Missoula, MT, USA)
- Alexander ME, Cruz MG (2011) What are the safety implications of crown fires? In Fox R (ed) 'Proceedings of 11th International Wildland Fire Safety Summit', Missoula, MT, USA. (International Association of Wildland Fire: Missoula, MT, USA)
http://www.fs.fed.us/wwetac/projects/PDFs/IWFSS_2011Paper_Alexander_Cruz_CrownFire_Safety.pdf.
- Alexander ME, Fogarty LG (2002) A pocket card for predicting fire behaviour in grasslands under severe burning conditions. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Fire Technology Transfer Note 25. (Ottawa, ON, Canada)
<http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/22777.pdf>.
- Alexander ME, Mutch RW, Davis KM, Bucks CM (2017) Wildland fires: Dangers and survival. 'Auerbach's Wilderness Medicine'. (Ed PS Auerbach) pp. 276–318. (Elsevier Health Sciences: Philadelphia, PA, USA)
- Alexander ME, Thorburn WR (2015) LACES: Adding an 'A' for Anchor point(s) to the LCES wildland firefighter safety system. 'Current International Perspectives on Wildland Fires, Mankind and the Environment'. (Eds B Leblon, ME Alexander) pp. 121–144. (Nova Science Publishers: New York)
- Anderson DH, Catchpole EA, De Mestre NJ, Parkes T (1982) Modelling the spread of grass fires. *The Journal of the Australian Mathematical Society Series B Applied Mathematics* **23**, 451–466. doi:10.1017/S0334270000000394.
- Australia Bureau of Meteorology (1985) 'Report on the Meteorological Aspects of the Ash Wednesday Fires, 16 February 1983.' (Australian Government Publishing Service: Canberra)
<https://books.google.com.au/books?id=4jm4AAAAIAAJ>.
- Australia Bureau of Meteorology (2017) Weather station directory.
<http://www.bom.gov.au/climate/data-services/>.
- Battesti A (1997) Vulcain ou l'histoire d'une tentative pour commencer à changer les choses dans le système Feux de Forêt méditerranéenne. *Forêt méditerranéenne* 143–144.
- Baxter J (1984) 'Who burned Australia? The Ash Wednesday fires.' (New English Library: London)
- Bisgambiglia P-A, Rossi J-L, Franceschini R, Chatelon F-J, Bisgambiglia PA, Rossi L, Marcelli T (2017) DIMZAL: A Software Tool to Compute Acceptable Safety Distance. *Open Journal of Forestry* **7**, 11–33. doi:10.4236/ojf.2017.71002.

- Blanchi R, Leonard J, Haynes K, Opie K, James M, Dimer de Oliveira F (2014) Environmental circumstances surrounding bushfire fatalities in Australia 1901–2011. *Environmental Science & Policy* **37**, 192–203. doi:10.1016/j.envsci.2013.09.013.
- Blanchi R, Leonard J, Haynes K, Opie K, James M, Kilinc M, Dimer de Oliveira F, Van den Honert R (2012) Life and house loss database description and analysis. CSIRO, Bushfire CRC report to the Attorney-General's Department. CSIRO EP-129645. (Melbourne, Australia) doi:10.4225/08/584af3d322e91.
- Bowman DMJS, Williamson GJ, Abatzoglou JT, Kolden CA, Cochrane MA, Smith AMS (2017) Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nature Ecology & Evolution* **1**, 0058. doi:10.1038/s41559-016-0058.
- Burnham KP, Anderson DR (2003) 'Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach.' (Springer Science & Business Media: New York)
- Bush Fire Council of NSW, NSW Rural Fire Service (Eds) (1978) 'Bush fire bulletin.' (Bush Fire Council of N.S.W: Sydney, Australia) <http://nla.gov.au/nla.obj-284283986>.
- Butler BW (2014) Wildland firefighter safety zones: a review of past science and summary of future needs. *International Journal of Wildland Fire* **23**, 295–308. doi:10.1071/WF13021.
- Butler BW, Bartlette RA, Bradshaw LS, Cohen JD, Andrews PL, Putnam T, Mangan RJ (1998) Fire behavior associated with the 1994 South Canyon Fire on Storm King Mountain, Colorado. USDA Forest Service, Research Paper RMRS-RP-9 (Fort Collins, CO, USA)
- Carbonell G, Monet JP, Dusserre G, Sauvagnargue-Lesage S (2004) Embrasement généralisé éclair en feu de forêt. Ecole des Mines d'Alès - Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches du Rhône, (Alès, FR)
- Cardil A, Molina DM (2015) Factors Causing Victims of Wildland Fires in Spain (1980–2010). *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* **21**, 67–80. doi:10.1080/10807039.2013.871995.
- Cardil A, Molina D, Kobziar L (2014) Extreme temperature days and potential impacts in Southern Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2**, 3863–3886. doi:10.5194/nhessd-2-3863-2014.
- Castellnou M, Larranaga A, Miralles M, Vilalta O, Molina D (2010) Wildfire Scenarios: Learning from Experience. 'Towards Integrated Fire Management - Outcomes of the European Project Fire Paradox'. (Eds JS Silva, FC Rego, P Fernandes, E Rigolot) pp. 121–132. (European Forest Institute: Joensuu, Finland)
- CFA (1983) The major fires originating 16th February, 1983. Country Fire Authority, Victoria, (Malvern, VIC, Australia) <http://nla.gov.au/nla.cat-vn6816681>.
- CFA (1999) Reducing the risk of entrapment in wildfires : a case study of the Linton fire. Country Fire Authority, 0731176006. (Melbourne, Australia)
- CFA (2016) Audit of Health and Safety Critical Risk Controls for Entrapments and Burnover. Country Fire Authority. D16/4674, (Melbourne, Australia)

- Chandler C, Cheney P, Thomas P, Trabaud L, Williams D (1983) 'Fire in forestry. Volume 1. Forest fire behavior and effects. Volume 2. Forest fire management and organization.' (John Wiley & Sons, Inc.: New York)
- Chatelon F-J, Sauvagnargue S, Dusserre G, Balbi J-H (2014) Generalized Blaze Flash, a 'Flashover' Behavior for Forest Fires - Analysis from the Firefighter's Point of View. *Open Journal of Forestry* **4**, 547–557.
- Cheney P, Gould J, McCaw L (2001) The dead-man zone—a neglected area of firefighter safety. *Australian Forestry* **64**, 45–50.
- Cheney NP, Sullivan AL (2008) 'Grassfires fuel, weather and fire behaviour. Second edition.' (CSIRO Publishing: Collington, VIC, Australia)
- Chetehouna K, Barboni T, Zarguili I, Leoni E, Simeoni A, Fernandez-Pello AC (2009) Investigation on the Emission of Volatile Organic Compounds from Heated Vegetation and Their Potential to Cause an Accelerating Forest Fire. *Combustion Science and Technology* **181**, 1273–1288. doi:10.1080/00102200903181827.
- Chevrou RB (2005) 'Pourquoi les incendies de forêts sont-ils si meurtriers?' (EDP Sciences: Paris)
- Collins P (2006) 'Burn: The Epic Story of Bushfire in Australia.' (Allen & Unwin: Crows Nest, NSW, Australia) <https://books.google.com.au/books?id=hWZ331BOI10C>.
- Collins RD (2012) Forest fire management in Portugal : developing system insights through models of social and physical dynamics. MSc Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/72651>.
- Coroners Court of Wollongong (1981) Inquest Findings of Waterfall Fire at Sutherland 3/11/1980. NSW Attorney General's Department, (Wollongong, NSW, Australia)
- Costa P, Castellnou M, Larranaga A, Miralles M, Kraus D (2011) Prevention of large wildfires using the fire types concept. Generalitat de Catalunya, Fire Paradox European Project (Barcelona, Spain) www.efi.int/files/attachments/publications/handbook-prevention-large-fires_en.pdf.
- Cruz MG, Gould JS, Alexander ME, Sullivan AL, McCaw WL, Matthews S (2015) A Guide to Rate of Fire Spread Models for Australian Vegetation. Revised edition. CSIRO Land and Water Flagship, 9780987206541. (AFAC Melbourne, Australia)
- Cruz MG., Hurley R, Bessell R, Nichols D (2016) Brucknell vehicle burn trial - report on fuels, weather and fire behaviour. CSIRO, (Canberra, Australia) doi:10.4225/08/58518b95798ad.
- Cruz MG, Sullivan AL, Gould JS, Sims NC, Bannister AJ, Hollis JJ, Hurley RJ (2012) Anatomy of a catastrophic wildfire: The Black Saturday Kilmore East fire in Victoria, Australia. *Forest Ecology and Management* **284**, 269–285. doi:10.1016/j.foreco.2012.02.035.
- Curt T, Borgniet L, Bouillon C (2013) Wildfire frequency varies with the size and shape of fuel types in southeastern France: Implications for environmental management. *Journal of Environmental Management* **117**, 150–161.
- Curt T, Frejaville T (2017) Wildfire Policy in Mediterranean France: How Far is it Efficient and Sustainable? *Risk Analysis* **38**, 472–488. doi:10.1111/risa.12855.

- Curt T, Fréjaville T, Lahaye S (2016) Modelling the spatial patterns of ignition causes and fire regime features in southern France: implications for fire prevention policy. *International Journal of Wildland Fire* **25**, 785–796. doi:10.1071/WF15205.
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen L, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette JJ, Park BK, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut JN, Vitart F (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **137**, 553–597. doi:10.1002/qj.828.
- Département de l'Aude (2008) Plan départemental de protection des forêts contre l'incendie 2008-2014. Conseil Général de l'Aude, Conservatoire de la forêt méditerranéenne, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Office national des forêts et Service départemental d'incendie et de secours de l'Aude, (Carcassonne, France)
https://www.ofme.org/documents/textesdfci/PDPFCI/pdpfci11_A.pdf.
- Department of Parks and Wildlife (2015) Northcliffe (O'Sullivan) Bushfire Area Fire Age as at 16 January 2015, unpublished.
[http://www.parliament.wa.gov.au/publications/tabledpapers.nsf/displaypaper/3912988a10329d3b75ef952248257e680037f9fb/\\$file/2988.pdf](http://www.parliament.wa.gov.au/publications/tabledpapers.nsf/displaypaper/3912988a10329d3b75ef952248257e680037f9fb/$file/2988.pdf).
- Diakakis M, Xanthopoulos G, Gregos L (2016) Analysis of forest fire fatalities in Greece: 1977-2013. *International Journal of Wildland Fire* **25**, 797–809.
- Direction de la Sécurité Civile (1994) 'Guide de stratégie générale pour la protection de la forêt contre l'incendie.' (Paris)
- Direction de la Sécurité Civile (2009) 'Guide national de référence emplois et formations feux de forêts.' (Paris)
<https://www.interieur.gouv.fr/content/.../GNR%20FDF%20consolide%2002072009.pdf>.
- Dowdy AJ, Mills GA, Finkele K, de Groot W (2010) Index sensitivity analysis applied to the Canadian Forest Fire Weather Index and the McArthur Forest Fire Danger Index. *Meteorological Applications* **17**, 298–312. doi:10.1002/met.170.
- Dray S, Dufour AB (2007) The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software* **22**, 1–20.
- Drysdale DD, Macmillan AJR, Shilitto D (1992) The King's Cross fire: Experimental verification of the 'Trench effect'. *Fire Safety Journal* **18**, 75–82. doi:10.1016/0379-7112(92)90048-H.
- Duane A, Aquilué N, Gil-Tena A, Brotons L (2016) Integrating fire spread patterns in fire modelling at landscape scale. *Environmental Modelling & Software* **86**, 219–231.
doi:10.1016/j.envsoft.2016.10.001.
- Duane A, Pique M, Castellnou M, Brotons L (2015) Predictive modelling of fire occurrences from different fire spread patterns in Mediterranean landscapes. *International Journal of Wildland Fire* **24**, 407–418.
- Edgar RA, Sharples JJ, Sidhu HS (2016) Examining the effects of convective intensity on plume attachment in threedimensional trenches. In 'Chemeca 2016: Chemical Engineering-

- Regeneration, Recovery and Reinvention', Adelaide, SA, Australia. 613–621. (Engineers Australia: Adelaide, SA, Australia)
- Ellis PFM (2015) The likelihood of ignition of dry-eucalypt forest litter by firebrands. *International Journal of Wildland Fire* **24**, 225–235. doi:10.1071/WF14048.
- Fendell FE, Wolff MF (2001) Chapter 6 - Wind-Aided Fire Spread. 'Forest Fires'. (Eds EA Johnson, K Miyanishi) pp. 171–223. (Academic Press: San Diego, USA) doi:10.1016/B978-012386660-8/50008-8.
- Ferguson E (2016) Reframing Rural Fire Management: Report of the Special Inquiry into the January 2016 Waroona Fire. Government of Western Australia Public Sector Commission, (Perth, Australia) <https://publicsector.wa.gov.au/document/reframing-rural-fire-management-report-special-inquiry-january-2016-waroon-fire>.
- Fernandes PM, Barros AMG, Pinto A, Santos JA (2016) Characteristics and controls of extremely large wildfires in the western Mediterranean Basin. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **121**, 2141–2157. doi:10.1002/2016JG003389.
- Fernandes PM, Pacheco AP, Almeida R, Claro J (2016) The role of fire-suppression force in limiting the spread of extremely large forest fires in Portugal. *European Journal of Forest Research* **135**, 253–262. doi:10.1007/s10342-015-0933-8.
- Finney MA (1998) FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Res. Pap. RMRS-RP-4, Revised 2004. (Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station) <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4>.
- Frejaville T, Curt T (2015) Spatiotemporal patterns of changes in fire regime and climate: defining the pyroclimates of south-eastern France (Mediterranean Basin). *Climatic Change* **129**, 239–251.
- Frejaville T, Curt T (2017) Seasonal changes in the human alteration of fire regimes beyond the climate forcing. *Environmental Research Letters* **12**, 035006.
- Fryer GK, Dennison PE, Cova TJ (2013) Wildland firefighter entrapment avoidance: modelling evacuation triggers. *International Journal of Wildland Fire* **22**, 883–893. doi:10.1071/WF12160.
- Gallant JC, Wilson JP (2000) Primary topographic attributes. 'Terrain Analysis: Principles and Applications'. (Eds JP Wilson, JC Gallant) pp. 51–85. (John Wiley & Sons Inc.: New York)
- Gammage B (2012) 'The Biggest Estate on Earth. How Aborigines Made Australia.' (Allen & Unwin: Crows Nest, NSW, Australia)
- Giannakopoulos C, LeSager P, Moriondo M, Bindi M, Karali A, Hatzaki M, Kostopoulou E (2012) Comparison of fire danger indices in the Mediterranean for present day conditions. *Forest-Biogeosciences and Forestry* **5**, 197–203.
- Gibbs K, Slijepcevic A, Wells T, Fogarty L (2014) Building Fire Behavior Analyst (FBAN) Capability and Capacity: Lessons Learned From Victoria, Australia's Bushfire Behavior Predictive Services Strategy. In Keane R, Jolly M, Parson R, Riley K (eds) 'the large wildland fires conference', Missoula, MT, USA. 91. (USDA Forest Service: Missoula, MT, USA)

- Goldammer JG, Furyaev VV (1996) Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia: Ecological Impacts and Links to the Global System. 'Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia'. (Eds JG Goldammer, VV Furyaev) pp. 1–20. (Springer Netherlands: Dordrecht) doi:10.1007/978-94-015-8737-2_1.
- de Groot WJ (1987) Interpreting the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System. In 'Fourth Central Regional Fire Weather Committee Scientific and Technical Seminar', Edmonton, AB, Canada. (Canadian Forestry Service, Northern Forestry Centre: Edmonton, AB, Canada) <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/23688.pdf>.
- Grose MR, Fox-Hughes P, Harris RMB, Bindoff NL (2014) Changes to the drivers of fire weather with a warming climate – a case study of southeast Tasmania. *Climatic Change* **124**, 255–269. doi:10.1007/s10584-014-1070-y.
- Haines DA (1988) A lower atmosphere severity index for wildland fires. *National Weather Digest* **13**, 23–27.
- Hardy CC, Hardy CE (2007) Fire danger rating in the United States of America: an evolution since 1916. *International Journal of Wildland Fire* **16**, 217–231.
- Harris S, Mills G, Brown T (2017) Variability and drivers of extreme fire weather in fire-prone areas of south-eastern Australia. *International Journal of Wildland Fire* **26**, 177–190. doi:10.1071/WF16118.
- Herald, Weekly Times (1983) 'Ash Wednesday 1983 bushfires.' (Herald and Weekly Times: Melbourne, Australia)
- Hilton JE, Miller C, Sharples JJ, Sullivan AL (2016) Curvature effects in the dynamic propagation of wildfires. *International Journal of Wildland Fire* **25**, 1238–1251. doi:10.1071/WF16070.
- Jolly WM, Freeborn PH (2017) Towards improving wildland firefighter situational awareness through daily fire behaviour risk assessments in the US Northern Rockies and Northern Great Basin. *International Journal of Wildland Fire* **26**, 574–586.
- Lahaye S, Curt T, Frejaville T, Sharples J, Paradis L, Hely C (2018) What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France? *International Journal of Wildland Fire* **27**, 155–163. doi:10.1071/WF17087.
- Lahaye S, Curt T, Hely C (2016) Which configurations cause entrapment risk? In '5th International Fire Behaviour and Fuels Conference', Portland, OR, USA and Melbourne, Australia. (International Association of Wildland Fire: Portland, OR, USA and Melbourne, Australia)
- Lahaye S, Curt T, Paradis L, Hely C (2014) Classification of large wildfires in South-Eastern France to adapt suppression strategies. In Viegas DX (ed) 'Proceedings of the 7th International Conference on Forest Fire Research 17-20 Nov 2014', Coimbra, Portugal. 696–708. (ADAI: Coimbra, Portugal) doi:10.4195/978-989-26-0884-6.
- Lahaye S, Sharples J, Matthews S, Heemstra S, Price O (2017) What are the safety implications of dynamic fire behaviours? In 'The 22nd International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2017)', Hobart, Australia. 1125–1130. (Syme, G., Hatton MacDonald, D., Fulton, B. and Piantadosi, J.: Hobart, Australia) <https://www.mssanz.org.au/modsim2017/H10/lahaye.pdf>.

- Lahaye S, Sharples J, Matthews S, Heemstra S, Price O, Badlan R (2018) How do weather and terrain contribute to firefighter entrapments in Australia? *International Journal of Wildland Fire* **27**, 85–98. doi:10.1071/WF17114.
- Larsson J (2016) 'eulerr: Area-Proportional Euler Diagrams.' <https://cran.r-project.org/package=eulerr>.
- Leading Emergency Services (2012) Major Incident Review Black Cat Creek Fire 12 October 2012. Prepared for Department of Environment and Conservation, Department of Fire and Emergency Services, City of Albany, (Australia) [https://www.dfes.wa.gov.au/publications/MajorIncidentReports/Major%20Incident%20Review%20-%20Black%20Cat%20Creek%20Fire%20\(October%202012\).pdf](https://www.dfes.wa.gov.au/publications/MajorIncidentReports/Major%20Incident%20Review%20-%20Black%20Cat%20Creek%20Fire%20(October%202012).pdf).
- Legislative Council (2000) Report on Inquiry into the NSW Rural Fire Service. General Purpose Standing Committee No 5 Legislative Council, 6. (Sydney, Australia) <https://www.parliament.nsw.gov.au/committees/DBAssets/InquiryReport/ReportAcrobat/6005/RFS%20Final%20Report.pdf>.
- Luke RH, McArthur AG (1978) 'Bushfires in Australia.' (Australian Government Publishing Service: Canberra)
- Maclean N (1992) 'Young men and fire.' (University of Chicago Press: Chicago, USA) <https://search.library.wisc.edu/catalog/999694827902121>.
- Maggiani F, Maggiani F (2012) 'À l'épreuve du feu.' (Cherche Midi: Paris) <https://books.google.fr/books?id=y94nmHWtLQkC>.
- Mangan RJ (2007) Wildland firefighter fatalities in the United States: 1990-2006. National Wildfire Coordination Group, Safety and health Working Team, National Interagency Fire Center. NWCG PMS 841, (Boise, ID, USA)
- Mateus P, Fernandes PM (2014) Forest Fires in Portugal: Dynamics, Causes and Policies. 'Forest Context and Policies in Portugal: Present and Future Challenges'. (Ed F Reboredo) pp. 97–115. (Springer International Publishing: Cham, Switzerland) doi:10.1007/978-3-319-08455-8_4.
- Matthews S (2009) A comparison of fire danger rating systems for use in forests. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* **58**, 41–48.
- McArthur AG (1967) Fire behaviour in eucalyptus forests. Forest Research Institute, Forest and Timber Bureau of Australia. Leaflet 107, (Canberra, Australia)
- McLeod RN, Pascoe SM, Teague BG (2010) '2009 Victorian Bushfires Royal Commission : final report.' (2009 Victorian Bushfires Royal Commission: Melbourne, Australia) <http://www.royalcommission.vic.gov.au/Commission-Reports>.
- McRae RHD (1992) Prediction of Areas Prone to Lightning Ignition. *International Journal of Wildland Fire* **2**, 123–130. doi:10.1071/WF9920123.
- McRae RHD, Sharples J (2013) A process model for forecasting conditions conducive to blow-up fire events. In Piantadosi J, Anderssen RS, Boland J (eds) 'MODSIM2013, 20th International Congress on Modelling and Simulation', Canberra, Australia. 187–192. (Modelling and

- Simulation Society of Australia and New Zealand: Canberra, Australia)
www.mssanz.org.au/modsim2013.
- Meteo France (2016) Resau RADOME de stations meteorologiques professionnelles.
<http://www.meteofrance.com>.
- Milligan J (1992) 'Ash Wednesday in Upper Beaconsfield.' (Country Fire Authority: Melbourne, Australia) <https://books.google.com.au/books?id=VcvYGwAACAAJ>.
- Mills GA (2005) On the sub-synoptic scale meteorology of two extreme fire weather days during the Eastern Australian fires of January 2003. *Australian Meteorological Magazine* **54**, 265–290.
- Mills GA, McCaw WL (2010) Atmospheric stability environments and fire weather in Australia : extending the Haines index. Centre for Australian Weather and Climate Research, CAWCR technical report 20. (Melbourne, Australia)
http://www.cawcr.gov.au/publications/technicalreports/CTR_020.pdf.
- Molina D, Castellnou M, Garcia-Marco D, Salgueiro A (2010) Improving fire management success through fire behaviour specialists. 'Towards integrated fire management - outcomes of the european project fire paradox'. (Eds JS Silva, FC Rego, P Fernandes, E Rigolot) pp. 105–119. (European Forest Institute: Joensuu, Finland)
- Moreira F, Viedma O, Arianoutsou M, Curt T, Koutsias N, Rigolot E, Barbati A, Corona P, Vaz P, Xanthopoulos G, Mouillot F, Bilgili E (2011) Landscape - wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. *Journal of Environmental Management* **92**, 2389–2402. doi:10.1016/j.jenvman.2011.06.028.
- Moritz MA, Parisien M-A, Batllori E, Krawchuk MA, Van Dorn J, Ganz DJ, Hayhoe K (2012) Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere* **3**, 1–22. doi:10.1890/ES11-00345.1.
- Morvan D (2010) Physical Phenomena and Length Scales Governing the Behaviour of Wildfires: A Case for Physical Modelling. *Fire Technology* **47**, 437–460.
- National Wildfire Coordinating Group (2014) 'Incident Response Pocket Guide.' (National Wildfire Coordinating Group. PMS 461 NFES 1077: Boise, ID, USA)
- New South Wales Government (2009) Coroners Act 2009 No 41. (Sydney, Australia)
<http://www.legislation.nsw.gov.au/#/view/act/2009/41>.
- New South Wales Rural Fire Service (2010) 'Firefighters' pocket book.' (New South Wales Rural Fire Service V.1.3: Sydney, Australia)
- Noble IR, Gill AM, Bary GAV (1980) McArthur's fire-danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology* **5**, 201–203. doi:10.1111/j.1442-9993.1980.tb01243.x.
- O'Connor P, O'Connor BJ (1993) 'Out of the Ashes: The Ash Wednesday Bushfires in the South East of S.A., 16th February 1983.' (P. and B. O'Connor: Mt Gambier, SA, Australia)
<https://books.google.com.au/books?id=83tIAAAACAAJ>.
- Otero I, Nielsen JØ (2017) Coexisting with wildfire? Achievements and challenges for a radical social-ecological transformation in Catalonia (Spain). *Geoforum* **85**, 234–246.
doi:10.1016/j.geoforum.2017.07.020.

- Pacheco AP, Claro J, Fernandes PM, de Neufville R, Oliveira TM, Borges JG, Rodrigues JC (2015) Cohesive fire management within an uncertain environment: a review of risk handling and decision support systems. *Forest Ecology and Management* **347**, 1–17.
- Pacheco AP, Claro J, Oliveira T (2014) Simulation analysis of the impact of ignitions, rekindles, and false alarms on forest fire suppression. *Canadian Journal of Forest Research* **44**, 45–55. doi:10.1139/cjfr-2013-0257.
- Page WG, Butler BW (2017) An empirically based approach to defining wildland firefighter safety and survival zone separation distances. *International Journal of Wildland Fire* **26**, 655–667. doi:10.1071/WF16213.
- Pearce HG, Hamilton RW, Millman RI (2004) Fire behaviour and firefighter safety implications associated with the Bucklands Crossing Fire burnover of 24 March 1998. Forest Research, Rotorua, in association with the New Zealand Fire Service Commission and the National Rural Fire Authority, Forest and Rural Fire Scientific and Technical Series 4. (Wellington, NZ)
- Perriez F, Bartet JH, Barthelemy F, Foin P, Battesti JP, David JP (2003) Rapport relatif à la protection contre les incendies des forêts après les feux de 2003. Mission interministérielle, (Paris) <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/044000283.pdf>.
- Potter BE (2002) A dynamics based view of atmosphere-fire interactions. *International Journal of Wildland Fire* **11**, 247–255. doi:10.1071/WF02008.
- Potter BE, Hernandez JR (2017) Downdraft outflows: climatological potential to influence fire behaviour. *International Journal of Wildland Fire* **26**, 685–692. doi:10.1071/WF17035.
- Pyne SJ (2001) 'Year of the Fires: The Story of the Great Fires of 1910.' (Viking: New York) <https://books.google.com.au/books?id=UUCMKAACAAJ>.
- Pyne SJ, Andrews PL, Laven RD (Eds) (1996) 'Introduction to wildland fire.' (John Wiley and Sons: New York)
- R Core Team (2016) 'R: A Language and Environment for Statistical Computing.' (R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria) <http://www.R-project.org/>.
- Raposo JR, Cabiddu S, Viegas DX, Salis M, Sharples J (2015) Experimental analysis of fire spread across a two-dimensional ridge under wind conditions. *International Journal of Wildland Fire* **24**, 1008–1022. doi:10.1071/WF14150.
- Réseau Coupures de combustible (2009) 'Guide Pratique d'Entretien des Coupures de Combustible par le Pastoralisme.' (Cardère: Marseille, France) <https://cardere.fr/coupures-de-combustible/129-guide-pratique-d-entretien-des-coupures-de-combustible-par-le-paturage.html>.
- Rothermel RC (1991) Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. Research Paper INT-RP-438, (Ogden, UT, USA)
- Ruffault J, Moron V, Trigo RM, Curt T (2016) Daily synoptic conditions associated with large fire occurrence in Mediterranean France: evidence for a wind-driven fire regime. *International Journal of Climatology* **37.1**, 524–533. doi:10.1002/joc.4680.

- San-Miguel-Ayanz J, Moreno JM, Camia A (2013) Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *Forest Ecology and Management* **294**, 11–22. doi:10.1016/j.foreco.2012.10.050.
- Schaller P (2004) ‘Ma saison en enfer.’ (Flammarion: Paris)
- Schapel AE (2007) Wangary bushfires inquest finding. South Australia State Coroner’s Office, (Adelaide, Australia) <http://trove.nla.gov.au/version/33439676>.
- Sharples J (2009) An overview of mountain meteorological effects relevant to fire behaviour and bushfire risk. *International Journal of Wildland Fire* **18**, 737–754. doi:10.1071/WF08041.
- Sharples J, Cary GJ, Fox-Hughes P, Mooney S, Evans JP, Fletcher M-S, Fromm M, Grierson PF, McRae RHD, Baker P (2016) Natural hazards in Australia: extreme bushfire. *Climatic Change* **139**, 85–99. doi:10.1007/s10584-016-1811-1.
- Sharples J, Gill AM, Dold JW (2010) The trench effect and eruptive wildfires: lessons from the King’s Cross Underground disaster. In ‘Proceedings of Australian Fire and Emergency Service Authorities Council 2010 conference’, <http://www.maths.manchester.ac.uk/~jwd/articles/10-TEaEW.pdf>.
- Sharples J, McRae RHD, Weber RO (2010) Wind characteristics over complex terrain with implications for bushfire risk management. *Environmental Modelling & Software* **25**, 1099–1120. doi:10.1016/j.envsoft.2010.03.016.
- Sharples J, McRae RHD, Wilkes SR (2012) Wind–terrain effects on the propagation of wildfires in rugged terrain: fire channelling. *International Journal of Wildland Fire* **21**, 282–296. doi:10.1071/WF10055.
- Simpson CC, Sharples JJ, Evans JP (2016) Sensitivity of atypical lateral fire spread to wind and slope. *Geophysical Research Letters* **43**, 1744–1751. doi:10.1002/2015GL067343.
- Simpson CC, Sharples JJ, Evans JP, McCabe MF (2013) Large eddy simulation of atypical wildland fire spread on leeward slopes. *International Journal of Wildland Fire* **22**, 599–614. doi:10.1071/WF12072.
- South Australia Dept of Environment Water and Natural Resources (2016) Bushfires and Prescribed Burns History. <https://data.sa.gov.au/data/>.
- State Coroner’s Office (2001) Report of the investigation and inquests into a wildfire and the deaths of five firefighters at Linton on 2 December 1998. State Coroner’s Office, Victoria, (Melbourne, Australia) https://engage.vic.gov.au/download_file/1457/610.
- Stevenson J (2001) Inquest into the deaths of Mark Douglas Cupit, Claire Wynne Dean, George Allan Fitzsimmons and Eric Furlan and inquiry into fire at Mt Kuring-Gai National Park : part heard. Coroner’s Court, (Westmead, NSW, Australia) <http://trove.nla.gov.au/version/27188361>.
- Storey M, Price O, Tasker E (2016) The role of weather, past fire and topography in crown fire occurrence in eastern Australia. *International Journal of Wildland Fire* **25**, 1048–1060. doi:10.1071/WF15171.
- Sullivan AL (2009) Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire* **18**, 369–386.

- Tedim F, Leone V, Amraoui M, Bouillon C, Coughlan M, Delogu G, Fernandes P, Ferreira C, McCaffrey S, McGee T, Parente J, Paton D, Pereira M, Ribeiro L, Viegas D, Xanthopoulos G (2018) Defining Extreme Wildfire Events: Difficulties, Challenges, and Impacts. *Fire* **1**, 9. doi:10.3390/fire1010009.
- The Age, The Advertiser (1983) 'Ash Wednesday : Wednesday, February 16, 1983.' (The Age ; The Advertiser: Melbourne ; Adelaide, Australia)
- The State of Victoria Department of Environment Land Water & Planning (2017) Fire history overlay of most recent fires.
- Trabaud L (Ed) (1992) 'Les feux de forêts - Mécanismes, comportement et environnement.' (France sélection: Paris)
- Turco M, Bedia J, Di Liberto F, Fiorucci P, Von Hardenberg J, Koutsias N, Llasat MC, Xystrakis F, Provenzale A (2016) Decreasing Fires in Mediterranean Europe. *PLoS one* **11**,. doi:10.1371/journal.pone.0150663.
- USGS (2017) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. <https://earthexplorer.usgs.gov>.
- Van Wagner CE (1977) Effect of slope on fire spread rate. Canadian Forestry Service, Bi-monthly Research Notes 33: 7–8. (Edmonton, Alberta, Canada)
- Van Wagner CE (1987) Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service., Forestry Technical Report 35 (Ottawa, Canada) <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=19927>.
- Venn J (1880) I. On the diagrammatic and mechanical representation of propositions and reasonings. *Philosophical Magazine* **10**, 1–18. doi:10.1080/14786448008626877.
- Viegas DX (2004) A Mathematical Model For Forest Fires Blowup. *Combustion Science and Technology* **177**, 27–51. doi:10.1080/00102200590883624.
- Viegas DX (2006) Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire* **15**, 169–177. doi:10.1071/WF05050.
- Viegas DX, Raposo JR, Davim DA, Rossa CG (2012) Study of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts. Part 1. Analytical model and validation with no-slope laboratory experiments. *International Journal of Wildland Fire* **21**, 843–856. doi:10.1071/WF10155.
- Viegas DX, Simeoni A (2011) Eruptive Behaviour of Forest Fires. *Fire Technology* **47**, 303–320. doi:10.1007/s10694-010-0193-6.
- Viegas DX, Simeoni A, Xanthopoulos G, Rossa C, Ribeiro L, Pita L, Stipanicev D, Zinoviev A, Weber R, Dold J, Caballero D (2009) 'Recent Forest Fire Related Accidents in Europe.' (European Commission: Luxembourg) www.forest.jrc.ec.europa.eu/media/cms.../recent-forest-fire-related-accidents-in-europe.pdf.
- Werth PA, Potter BE, Alexander ME, Clements CB, Cruz MG, Finney MA, Forthofer JA, Goodrick S, Hoffman CM, Jolly WM, McAllister SS, Ottmar RD, Parson RA (2016) Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior: volume 2 for fire behavior specialists, researchers and

- meteorologists. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, General Technical Report PNW-GTR-891. (Portland, OR, USA) <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/50530>.
- Wilson CC (1977) Fatal and near-fatal forest fires: the common denominators. *The International Fire Chief* **43(9)**, 9–10, 12–15.
- Wilson BJ (1983) Inquest touching the death of Thomas Anthony Bielecke, Keith Campbell, Gregory John Moon : Inquiry into a fire at Royal National Park, Grays Point. Findings. City Coroners Court, (Glebe, NSW, Australia)
<http://nswrfs.intersearch.com.au/uploads//internal%20documents/5276.pdf>.
- Wu Y, Xing H, Atkinson GT (2000) Interaction of fire plume with inclined surface. *Fire safety journal* **35**, 391–403.
- Xanthopoulos G (2007) Forest fire related deaths in Greece: confirming what we already know. In '4th International Wildland Fire Conference', Seville, Spain.(Seville, Spain)
https://www.researchgate.net/publication/242307152_Forest_fire_related_deaths_in_Greece_confirming_what_we_already_know_1.
- Zamora FC (2007) Guía técnica para la investigación de accidentes en la extinción de incendios forestales. Gobierno de Espana, Ministerio de medio ambiente, (Madrid, Spain)
http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/8.Guia_tecnica_para_la_investigaci%C3%B3n_de_accidentes_tcm7-336275.pdf.
- Zhang Y, Lim S, Sharples J (2016) Modelling spatial patterns of wildfire occurrence in South-Eastern Australia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* **7**, 1800–1815.
doi:10.1080/19475705.2016.1155501.

Annexe 1: classification des grands feux en France

Cette annexe est une traduction, en Français, de la présentation réalisée en 2014 lors de la VII^{ème} International Conference on Forest Fire Research, à Coimbra, Portugal, et publiée initialement en Anglais dans les actes de la conférence avec la référence suivante :

Lahaye S., Curt T., Paradis L., Hely C. (2014) Classification of large Mediterranean wildfires to adapt suppression strategy. In *VII Int. Conf. on Forest Fire Research*, D.X. Viegas (Ed.), Coimbra, Portugal. Oral presentation.

Classification des grands feux de forêt en France : vers une nouvelle approche de la lutte.

Lahaye S. ¹, Curt T. ², Paradis L. ³, Hély C. ³

¹ Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches-du-Rhône, 1 av de Boisbaudran 13326 Marseille (France), slahaye@sdis13.fr

² Irstea EMAX Mediterranean Ecosystems and Risks, route Cézanne, 13182, Aix-en-Provence cedex 5 (France), thomas.curt@irstea.fr

³ Centre de Bio-Archéologie et d'Ecologie, UMR 5059 (CNRS/Univ. Montpellier 2/EPHE), Institut de Botanique, 163 rue A. Broussonet, 34090 Montpellier (France), christelle.hely-alleaume@univ-montp2.fr

Résumé

Les grands feux de forêts, qui vont continuer à se développer en zone méditerranéenne française, mettent régulièrement en danger les forces de lutte. Ces incendies répondent-ils à une classification spécifique ? Quels sont leurs marqueurs ? Pour répondre à ces questions, nous avons constitué une base de données de 153 feux parmi les plus grands de ces 25 dernières années. Nous avons réuni, pour chacun d'entre eux, à la fois des variables environnementales, d'autres caractérisant leur comportement ainsi que des données relatives aux actions de lutte. Nous avons effectué une classification hiérarchique, suivie d'une analyse prédictive par *Bootstrap Regression Trees*. Elles ont permis de dissocier 5 grandes classes d'incendies. Le type *Linéaire* est marqué par des paramètres modérés et, alors que la pente caractérise logiquement le type *Bascule*, que le vent est significatif pour les groupes *Enroulement* et *Rapide*, la sécheresse profonde se révèle être le marqueur déterminant du groupe *Très Grand*. Nous avons également déterminé que la probabilité d'accident est d'abord liée au nombre de moyens de lutte engagés. Cette étude guidera demain le contenu des formations d'analyste du feu en France. Elle ouvre la voie à des travaux complémentaires de cartographie prédictive du risque.

Mots clé

Grands incendies, typologie, sapeurs-pompiers, accidents, direction du vent, rythme de propagation.

Introduction

Avec une moyenne de 20 000Ha brûlés chaque année (Promethee 2014), la zone méditerranéenne française est largement concernée par la problématique des incendies de forêts. L'impact humain et

matériel y est particulièrement important et coûteux (San-Miguel-Ayanz *et al.* 2013). La lutte étant également très coûteuse, son efficacité constitue un enjeu considérable. Au-delà de ces considérations socio-économiques, ces feux, généralement estivaux, constituent aussi une perturbation majeure des écosystèmes ; ils façonnent le paysage en modifiant les dynamiques végétales et forestières (Keeley *et al.* 2012).

Si les incendies sont si fréquents dans le Sud-Est de la France, c'est que ce territoire concentre tous les facteurs du risque : un climat méditerranéen marqué par des épisodes de sécheresses estivales et l'omniprésence du Mistral (Curt *et al.* 2011) ; une densité de population importante qui engendre un aléa fort, notamment le long des axes de circulation et des zones habitées (Curt and Delcros 2010) et de vastes étendues de forêts non exploitées mais aussi de garrigues extrêmement combustibles (Curt *et al.* 2013). L'augmentation de la population au cours des dernières décennies, qui se traduit notamment par une extension des zones d'interface entre habitat et forêt, agit sur le risque à deux niveaux. D'une part, les départs de feux se multiplient ; d'autre part, ces interfaces sont extrêmement vulnérables au feu : inter-pénétrabilité des espaces combustibles et des lieux de vie, habitat isolé difficilement accessible aux secours (Lampin-Maillet *et al.* 2008). Dans les années à venir les changements d'usage du sol initiés depuis 50 ans et dominés par la déprise agricole et le recul des espaces pastoraux devraient encore s'accroître au profit de zones combustibles toujours plus nombreuses et fortement exposées (Moreira *et al.* 2011).

De surcroît, les changements climatiques devraient engendrer une augmentation de l'aléa dans cette région dans les décennies à venir. Les modèles climatiques prédisent en effet une élévation de la température moyenne, des vagues de chaleur plus fréquentes et une saison propice aux incendies plus longue (Moriondo *et al.* 2006). Il devrait en résulter à la fois une augmentation du nombre de départs de feux et des surfaces parcourues. Cela ne manquera pas de faire peser plus de pression sur les épaules des forces de lutte mais aussi des décideurs politiques chargés d'arbitrer la distribution des financements des actions préventives et curatives.

La distribution des tailles des feux est très dissymétrique, avec une grande proportion de petits feux et une faible part de grands feux. A l'instar des autres pays euro-méditerranéens, ce sont cependant ces grands incendies qui menacent le plus fortement les populations et les écosystèmes (San-Miguel-Ayanz *et al.* 2013). La définition même d'un « grand feu » dépend du contexte. En France la barre est généralement fixée à 100 Ha. La base de données Prométhée en recense 741 parmi les 442 000 incendies enregistrés entre 1989 et 2013. Ces grands feux sont généralement caractérisés par des sautes de feu et des vitesses de propagation importantes. Aussi leurs caractéristiques (forte dynamique temporelle et spatiale, virulence) les rendent excessivement difficiles à contrôler ; les opportunités d'action sont réduites pour les forces de lutte (Moreira *et al.* 2011).

En 1992, après plusieurs années au bilan lourd (1972, 1980, 1990), la stratégie de prévention et de lutte a été redéfinie autour de la notion d'attaque massive des feux naissants (Battesti 1992). Elle est aujourd'hui toujours en vigueur. Pour chaque zone est défini quotidiennement le niveau d'aléa d'éclosion et de propagation de feu. De cet aléa découle un niveau de risque et une mobilisation préventive associée de moyens de surveillance et de lutte, terrestres et aériens. C'est le premier volet de la stratégie. Le deuxième est l'engagement massif et rapide des moyens afin d'apporter une réponse surdimensionnée à toute éclosion de feu (Direction de la Sécurité Civile 1994).

Cette doctrine s'avère efficace en ce sens que les surfaces brûlées annuellement ont diminué depuis 1992 alors que le nombre d'éclosion restait constant et que la population ne cessait d'augmenter.

Cependant, quelques grands incendies continuent chaque année à échapper à l'attaque initiale et à parcourir des centaines, voir des milliers, d'hectares (Promethee 2014).

On peut même affirmer que ces grands feux vont continuer à menacer cette région pour deux raisons.

La première est que l'efficacité de la stratégie d'attaque des feux naissants opère une sélection négative propice aux grands feux. C'est le paradoxe du feu (Sande Silva *et al.* 2010): la disparition des petits feux (ainsi que des brûlages hivernaux contrôlés) engendre une accumulation de végétation combustible dans des espaces interconnectés où la lutte devient difficile et dangereuse.

Deuxièmement, les forces de lutte vont devoir faire face à de nouveaux enjeux avec le réchauffement climatique et l'extension de la zone soumise au risque, dans un contexte économique contraint. La réponse ne pourra plus être dans l'augmentation incessante des moyens mobilisés mais dans l'optimisation de ceux-ci. Les forces de lutte vont être amenées à agrandir leur territoire d'intervention, y compris au-delà des frontières nationales.

Pour toutes ces raisons, il est nécessaire d'avoir une meilleure compréhension, à visée opérationnelle, des différents types de grands feux et de leurs spécificités. Nous proposons de bâtir une classification des grands types d'incendies du Sud-Est de la France, ainsi que des modèles de prédiction des conditions favorables au développement de tel ou tel sous-type. Alors qu'une première classification a été réalisée en Catalogne (Costa *et al.* 2011), il n'en existe pas encore en France et, malgré des similitudes climatiques et végétales, on peut suspecter qu'il existe des spécificités, liées à la lutte par exemple. Ces connaissances doivent servir de socle pour former des 'analystes du feu' parmi les intervenants de la lutte. Des méthodes scientifiques rapides et robustes de prévision du risque et du comportement du feu doivent en effet être offertes aux experts pour remplacer les connaissances empiriques du phénomène qui diminuent aujourd'hui, l'expérience et la pratique de chacun s'amenuisant avec la diminution du nombre de petits feux (Castellnou *et al.* 2010).

Cette étude présente les résultats de recherches menées sur les feux dépassant 200 hectares ayant éclorés au cours de ces 25 dernières années en France méditerranéenne en répondant aux questions suivantes : existe-t-il différents types de grands incendies caractérisés par leur comportement et par leur dangerosité pour les intervenants ? Ces différents types peuvent-ils être caractérisés par des paramètres environnementaux du type couvert végétal, conditions météorologiques, topographie ?

Méthodes

Le jeu de données

293 incendies de plus de 200 hectares ont été enregistrés sur la base de données Prométhée pour la période 1989-2012. Il a fallu recueillir pour cette étude d'une part des *données de comportement*, décrivant le déroulement du feu et sa dangerosité, d'autre part des *données environnementales*, décrivant la météorologie, la végétation et la topographie et enfin des *données de lutte*, caractérisant l'action anthropique face à l'incendie. Pour obtenir ces données, il a fallu accéder à des rapports suffisamment détaillés et interviewer des cadres pompiers et forestiers dans 15 services territoriaux différents. Ce sont au total 38 officiers situés à des positions stratégiques sur les feux qui ont été questionnés et 81 rapports papiers ou informatiques qui ont été analysés.

Il a été possible de récolter des informations suffisamment précises pour 153 des 293 feux ; ce qui constitue le jeu de données de l'étude. La zone couverte s'étend des Alpes aux Pyrénées en passant par

les plateaux calcaires de Provence et du Languedoc. Elle inclue également la Corse avec ses spécificités insulaires.

Le recueil des données a nécessité de s'appuyer sur une couche géo référencée des contours de feux. C'est l'Office National des Forêts qui est chargé de cette base de données géographique, adossée à Prométhée. Elle est renseignée à l'issue de chaque incendie par une levée terrain du contour final réalisée par un technicien forestier. La précision de cette base a été testée par comparaison avec des images satellite utilisées dans une autre étude (Curt *et al.* 2013). Dans le département des Bouches-du-Rhône où les données ont été comparées, un écart de tracé de 22 Ha sur 44969 a été relevé, soit une différence non significative de 0,049%. Cette analyse, ainsi que les suivantes nécessitant l'utilisation d'un système d'information géographique, ont été réalisées grâce au logiciel *QuantumGIS 2-2 Valmiera* (<http://www.qgis.org>).

Données de comportement

Trois variables ont été sélectionnées pour caractériser le déroulement du feu et sa dangerosité.

La surface finale (SURF, en hectares) a permis de distinguer les grands feux (plusieurs centaines d'hectares) des très grands feux (plusieurs milliers). C'est la surface relevée sur la couche des contours. Elle varie parfois de la surface enregistrée sur la base Prométhée, qui peut être donnée par les services incendies avec moins de précision, notamment dans le cas des incendies les plus anciens.

Le rythme d'extension (HaH, en hectares par heure) représente l'accroissement du feu et pas seulement sa vitesse dans l'axe principal. Cette donnée a été extrapolée à partir des témoignages et des rapports par reconstruction des isochrones sur carte. Compte tenu que la phase d'ignition d'une part et d'extinction finale (noyage) d'autre part peuvent être longues, indépendamment du comportement du feu dans sa phase de croissance, seule la part de 10 à 90% de la surface finale a été considérée ici. Les incendies à rythme d'extension important sont dangereux en ce sens que les sapeurs pompiers ne peuvent pas se déplacer aussi vite que le feu.

Les changements d'axe de propagation principal du feu (DIRCHG) ont enfin été recherchés, partant de l'hypothèse que ces variations ne peuvent être dues qu'à une recombinaison des facteurs environnementaux. Lorsque l'axe de propagation principal de l'incendie s'est ouvert dans un angle inférieur à 60°, la variation a été considérée comme non significative (codé 0). Les changements d'axe compris entre 60 et 90°, alors que le vent était constant, ont été qualifiés d'*enroulement* (codé 1). Dans les autres cas, le changement de direction > 90°, voire l'inversion complète, a été codé 2. Ces variations, qui modifient la position du front de feu, sont par conséquent facteur de dangerosité pour la lutte.

Données environnementales

Les paramètres météorologiques viennent en premier lieu lorsqu'il s'agit d'appréhender les caractéristiques d'un incendie : taille, comportement, dangerosité (Pyne *et al.* 1996). Le *Fire Weather Index* (FWI) est aujourd'hui internationalement utilisé pour décrire la météorologie feu de forêt. Cet index intégratif et sans unité a été conçu à l'origine au Canada pour prévoir le niveau de risque en fonction des conditions du jour et de celles des jours précédents (Van Wagner 1987). Il est composé de six sous-indices qui intègrent les données relatives à la température de l'air, à l'hygrométrie, à la vitesse du vent et au cumul de précipitation sur 24 heures (Groot *et al.* 2007). Le FWI donne une méthode numérique uniforme pour graduer le niveau de danger d'incendie à travers un territoire, tant

en ce qui concerne le risque d'ignition que la facilité de propagation du feu. Il est largement utilisé en région méditerranéenne (Giannakopoulos *et al.* 2012).

Pour cette étude le FWI et ses sous-indices ont été recalculés pour chaque feu en utilisant un modèle intégratif quotidien sur une maille de 2*2 km. Compte tenu de la taille de certains incendies, la valeur attribuée est celle de la moyenne de l'indice à travers le périmètre du feu.

Les indices qui ont été retenus sont : (i) l'indice d'humus ou duff moisture code (DMC), qui relate la teneur en eau des couches superficielles de matière organique au sol et donne une indication de la combustibilité de l'étage arbustif de la végétation ; (ii) l'indice de sécheresse ou drought code (DC), qui relate la sécheresse des couches profondes et par conséquent la sensibilité au feu saisonnière de l'étage arboré. Ces 2 indices permettent d'intégrer à la fois les précipitations passées, la température et l'hygrométrie du jour. Ils n'intègrent pas la vitesse du vent, qui n'apparaît qu'au travers de l'indice de combustible léger, représentatif de l'humidité de la litière superficielle et par conséquent de la sensibilité de la strate herbacée. Cependant il n'est pas pertinent de considérer cet indice qui atteint des valeurs saturées en période estivale en région méditerranéenne. Aussi la vitesse moyenne du vent pendant la durée du feu (WINDSP, en mètres par heure) a été considérée en l'état à partir des relevés de la station météorologique la plus proche de l'incendie (Meteo France 2014).

Pour décrire la végétation, les couches de l'Institut Forestier National, établies entre 1986 et 2006 ont été utilisées (BDForêtV1 ; <http://inventaire-forestier.ign.fr>). Ces cartes étant actualisées tous les 10 ans, c'est la dernière levée précédant l'incendie qui a été prise en compte. Le type de formation végétale y est donné pour toute entité forestière ou naturelle supérieure à 2,25 Ha, par photo interprétation d'images aériennes en infrarouge. Selon le cycle d'inventaire, il peut y avoir jusqu'à 75 classes différentes de végétation. Elles ont été synthétisées en 4 classes pour l'étude : feuillus, conifères, garrigues et autres, cette dernière classe correspondant aux parcelles agricoles, aux formations pastorales et espaces verts urbains. La donnée retenue correspond au pourcentage de chacune de ces classes dans la surface parcourue par le feu.

Concernant l'aspect topographique, la pente moyenne du feu a été obtenue par croisement de la couche des contours de feu avec une couche au 1/25000 de pentes de l'Institut Géographique National (BDAlti25 ; <http://www.ign.fr>).

Données de lutte

Afin de quantifier les moyens terrestres engagés pour lutter contre l'incendie, le nombre de véhicules a été recensé (RESS). Il s'agit là du nombre maximum d'engins incendie présents simultanément au plus fort du sinistre, à l'exclusion des véhicules logistiques et de commandement.

Toute mention d'accident ou véhicule piégé par le feu (TRAP) a enfin été notée dès lors que les intervenants ont été blessés ou que le véhicule a été brûlé. Par ailleurs, sur ces grands incendies les sapeurs-pompiers sont régulièrement victimes de 'coups de fumée', généralement liés aux efforts effectués dans la chaleur et la fumée. Ces événements n'ont pas été considérés comme des accidents. De même les éventuels accidents de circulation d'intervenants en dehors du périmètre de l'incendie n'ont pas été intégrés dans cette catégorie.

Traitement des données

Tous les tests statistiques et les modélisations ont été réalisés avec le logiciel R (R Core Team 2013).

Chacune des variables surface (SURF) et rythme d'extension (HaH) a été répartie en 3 classes au moyen de la méthode d'optimisation naturelle de Jenks (Jenks 1967).

Une première classification des feux a été réalisée à partir des données de comportement avec le package R *Cluster* (Maechler *et al.* 2013). La méthode de partition autour des médoïdes a été utilisée avec des distances Euclidiennes et des données standardisées (Reynolds *et al.* 1992). Les résultats obtenus ont ensuite été représentés sur une carte afin d'identifier des *zones de feu* aux caractéristiques communes.

Pour établir l'influence des différentes données environnementales sur chaque groupe isolé par la classification, la technique des *Bootstrap Regression Trees* (BRT) a été utilisée. Cette méthode statistique est particulièrement adaptée pour explorer des variables écologiques et pour optimiser les performances de prédiction (De'Ath 2007). Elle est par ailleurs flexible et facile à lire (Elith *et al.* 2008). En outre les BRT prennent en compte la colinéarité entre variables. Nous avons utilisé les packages *dismo* et *gbm* sous R (Hijmans *et al.* 2013; Ridgeway and others 2013) avec une erreur de type Bernoulli. La moitié des données a été utilisée pour la construction du modèle et l'autre moitié pour évaluer la précision de la classification. Le nombre d'arbre dans chaque BRT a été automatiquement fixé à 20, avec une fraction de 0,5 et un taux d'apprentissage de 0,005. Nous avons évalué la qualité des modèles et de leur performance prédictive à l'aide de l'aire sous la courbe de l'opérateur de réception (AUC) (Pearce and Ferrier 2000). La performance a été jugée excellente quand $AUC > 0,9$ et faible quand $AUC < 0,6$.

Afin d'évaluer si les types d'incendies isolés précédemment présentent des niveaux de danger différents pour les secours, nous avons calculé, pour chacun de ces types, le taux de feux lors desquels un véhicule a été accidenté, ainsi que l'intervalle de confiance (Eq.1) dans lequel devait se trouver ce taux:

$$IC_{\alpha} = [f - z_{\alpha/2} \sqrt{f(1-f)/(n-1)} ; f + z_{\alpha/2} \sqrt{f(1-f)/(n-1)}] \quad (Eq.1)$$

Avec IC_{α} l'intervalle de confiance α , f le taux d'accident sur la distribution totale des feux, $z_{\alpha/2}$ coefficient de Student dépendant de α et de n , et n nombre de feux dans le groupe étudié.

Enfin, pour tester l'hypothèse que le risque d'accident (TRAP) augmente avec le nombre de véhicules engagé (RESS), la corrélation entre ces deux variables a été éprouvée par un test paramétrique de comparaison des moyennes (Eq.2):

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2, \text{ avec } IC_{(\mu_1 - \mu_2)} = [(\bar{a}_1 - \bar{a}_2) - z_{\alpha/2} * s \sqrt{(1/n_1 + 1/n_2)} ; (\bar{a}_1 - \bar{a}_2) + z_{\alpha/2} * s \sqrt{(1/n_1 + 1/n_2)}] \quad (Eq.2)$$

Où, pour chacune des distributions 1 (nombre de véhicules engagés sur les feux avec accident) et 2 (nombre engagé sur les feux sans accident), on a μ la moyenne de la population, \bar{a} la moyenne observée, n nombre d'incendie concerné et s variance pondérée des deux distributions.

Résultats

Données recueillies

La répartition des 153 incendies du jeu de données a été comparée à celle des 293 enregistrés sur Prométhée (Fig. 1). Les sinistres les plus importants, qui sont généralement mieux documentés, sont les mieux représentés dans cette étude: 74% des feux > 1000Ha pour 42% de ceux entre 200 et 500Ha. Si la distribution géographique des données résulte en partie de la facilité d'accès aux archives de certains services, la sous-représentation de la Haute-Corse s'explique autrement. Dans ce département où la pression incendiaire a été très forte dans les années 1990, il y a peu d'archives écrites. Aussi l'investigation, reposant essentiellement sur des témoignages oraux, s'est concentrée sur la période postérieure à 1995. Comme nous le montre le troisième diagramme de la Fig. 1, plus les incendies sont anciens, plus il est difficile de récolter l'information. C'est pourquoi notre jeu de données ne compte que 37% des feux de 1989 à 1999 pour 72% de ceux de 2000 à 2012. La variabilité saisonnière est en revanche bien représentée avec 93% des sinistres entre juin et septembre.

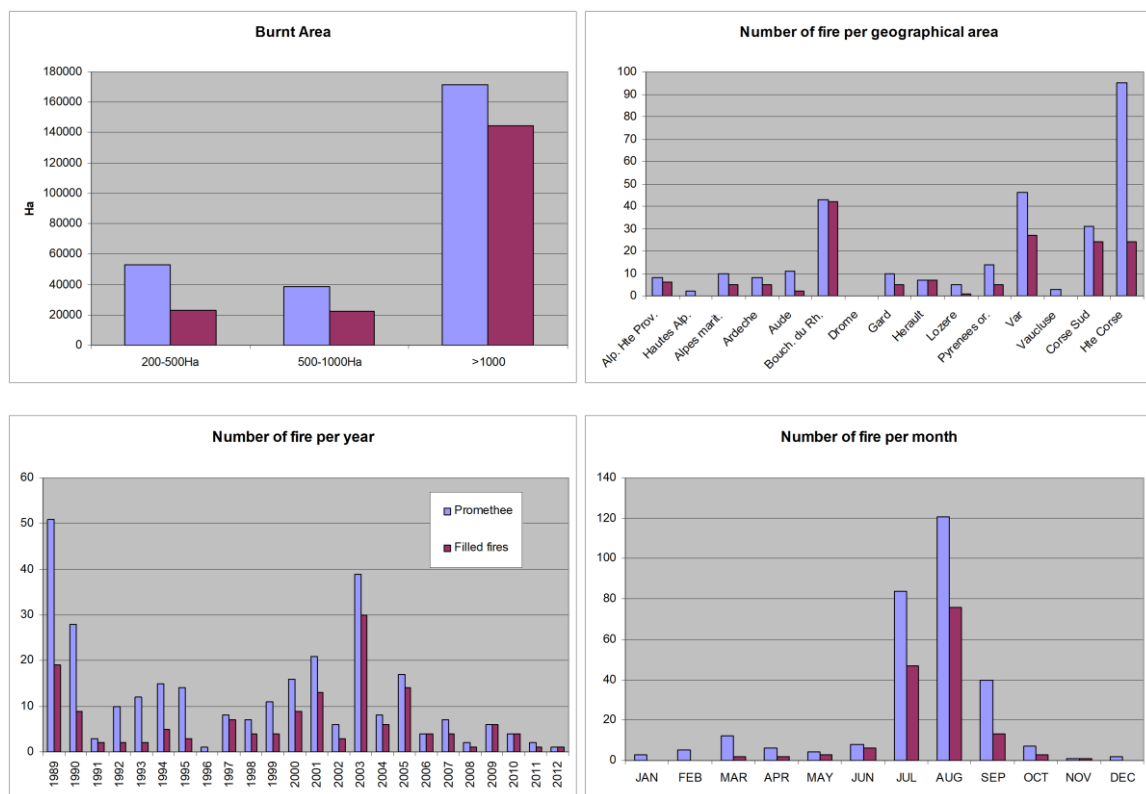


Fig. 1. Comparaison du jeu de données (barres rouges) avec les feux recensés sur Prométhée (barres bleues). En ce qui concerne les données de comportement et les données environnementales (Tabl. 1), les vitesses de vent relevées couvrent quasiment toute l'échelle de Beaufort, variant de « calme » à « tempête » avec une moyenne de « bonne brise ». Les valeurs moyennes des indices de sécheresse, quant à elles, peuvent être considérées comme exceptionnellement hautes suivant la classification nord-américaine (Van Wagner 1987). Les incendies étudiés se sont donc propagés avec des vents d'intensité différentes mais avec une sécheresse du combustible généralement importante voir très importante. La distribution de la végétation montre une nette prédominance de la garrigue sur la majorité des feux. Lorsqu'on trouve des formations plus boisées, ce sont plus souvent des conifères.

	WINDS P (km/h)	DC (--)	DMC (--)	SLOPE (degré)	SHRU B (ratio)	PINE (ratio)	BRDL V (ratio)	OTHE R (ratio)	RESS (engins)	HaH (Ha/H)	SURF (Ha)
Moyenn e	32	650	146	15	0.61	0.19	0.08	0.11	95	163	1239
Ecart- type	17	193	81	7	0.30	0.25	0.13	0.16	83	208	1738
Min.	0	24	18	3	0.00	0.00	0.00	0.00	9	1	208
Max.	90	1067	376	35	1.00	1.00	0.57	0.93	400	1359	14020

Tabl. 1. Variables récoltées: vitesse du vent (WINDSP) ; Indice de sécheresse de profondeur (DC), de sécheresse d'humus (DMC) ; pente (SLOPE) ; ratio de garrigue et maquis (SHRUB), pins (PINE), feuillus (BRDLV), autres végétations (OTHER) ; nombre de véhicules de lutte (RESS) ; rythme d'extension (HaH) ; surface finale (SURF).

Pour les autres variables, les résultats sont les suivants : 16% des feux se sont enroulés (DIRCHG=1) et 22% ont été l'objet d'une bascule de vent (DIRCHG=2). Il y a eu des accidents sur 16% des incendies (25 TRAP).

Classification des feux.

Selon la méthode de Jenks, la surface finale se répartit dans les 3 classes suivantes : 200 à 1999 Ha pour 84% des feux, 2000 à 7000 Ha pour 15% et > 7000 Ha pour 1%. De la même façon, le rythme d'extension est partitionné comme suit : 1 à 219 Ha/H pour 78%, 220 à 800 Ha/H pour 19% et > 800 Ha/H pour 3%.

La classification sous PAM est optimale avec 7 groupes. La structuration est alors bonne avec une proximité moyenne des individus dans leur groupe de 87% et 6 des 7 groupes dont la proximité moyenne est > 50%. Compte tenu des caractéristiques des feux pour les trois variables investiguées, un nom générique a été attribué à chaque groupe (Tabl.2).

Gr.	Nb. feux	Prox. moy.	SURF	HaH	DIRCHG	Nom
1	26	0.78	<2000	<800	2	Bascule
2	70	1.00	<2000	<220	0	Linéaire
3	16	1.00	<2000	<220	1	Enroulement
4	10	0.50	>2000	<220	0,1,2	Etendu

5	16	0.88	<2000	220à800	0,1	Rapide
6	11	0.41	>2000	220à800	0,1,2	Rapide et étendu
7	4	0.79	2000à700 0	>800	0,1	Méga

Tabl. 2. Groupes de feux obtenus par classification PAM et nombre d'individu par groupe. Le groupe est considéré comme homogène lorsque la proximité moyenne est $> 0,5$. Les caractéristiques du groupe sont données pour chaque variable ayant contribué au classement : *SURF*, *HaH*, *DIRCHG*. Le nom attribué synthétise ces caractéristiques.

Les trois premiers groupes sont ceux qui n'ont pas atteint de surface ni de rythme de progression très importants. Parmi ceux-ci, le groupe *Linéaire* est celui des feux qui ont suivi une direction constante, les feux *Enroulement* ont incliné leur axe de propagation et les *Bascule* ont totalement changé d'axe. Le groupe 4, *Etendu*, est celui des incendies qui ont atteint une surface finale importante sans progresser très rapidement. Les groupes 5 à 7 sont ceux qui se sont développés le plus rapidement, voir exceptionnellement rapidement pour les *Mega*. Parmi ces trois groupes, seuls ceux *Rapide* n'ont pas atteint la surface de 2000Ha.

Une analyse visuelle de la distribution spatiale des feux selon leur groupe (Fig.2) permet de distinguer 5 zones : Littoral Ouest (Pyrénées-Orientales, Aude, Hérault et Gard côtier), Provence (Bouches-du-Rhône et Ouest du Var), Maures/Esterel (Est du Var et Ouest des Alpes-Maritimes), Montagne (Nord et Est des Alpes-Maritimes, Alpes-de-Haute-Provence, Gard cévenol, Ardèche et Lozère) et Corse. Trois de ces zones émergent comme particulièrement affectées par les plus grands feux : Provence, Maures/Esterel et Corse. Des recherches complémentaires, hors du champ de cette étude, sont nécessaires pour aller plus loin dans l'interprétation spatiale.

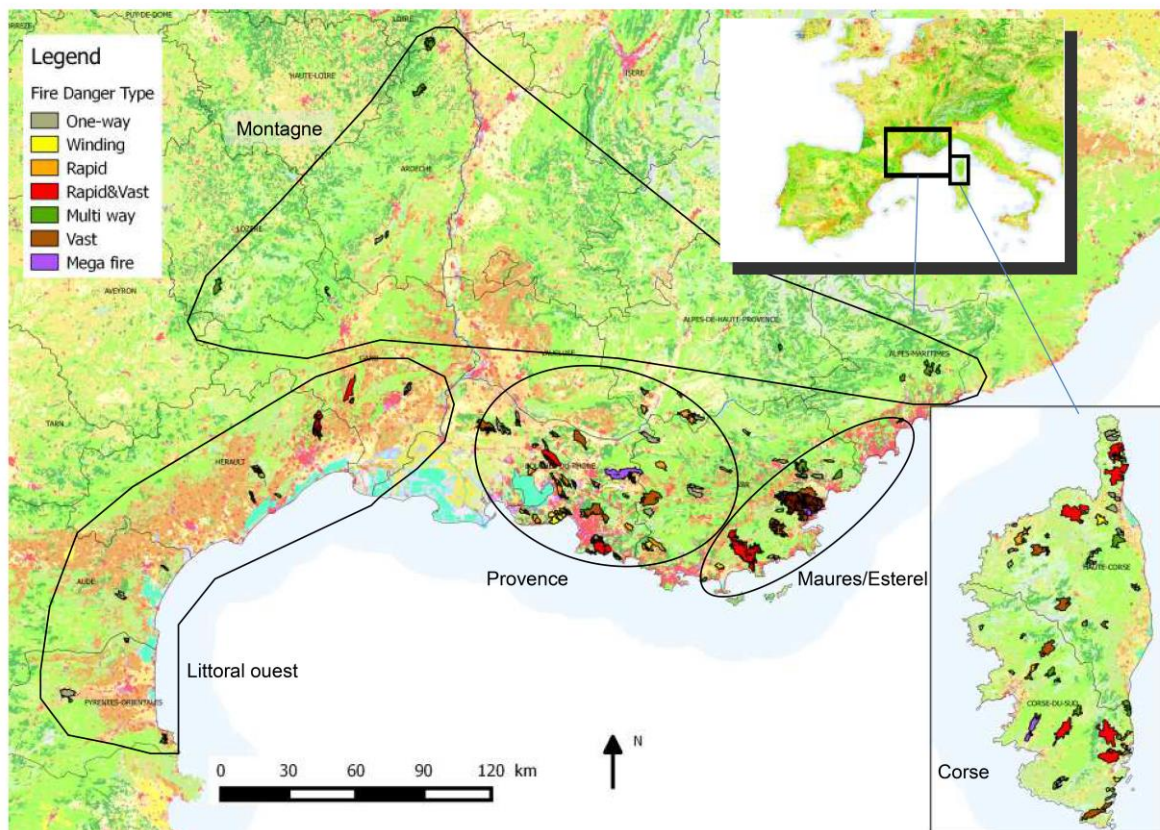


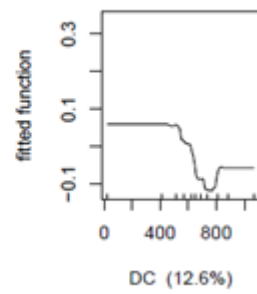
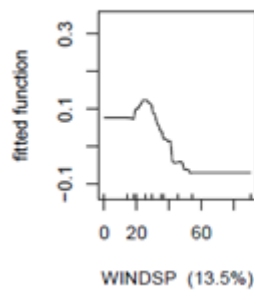
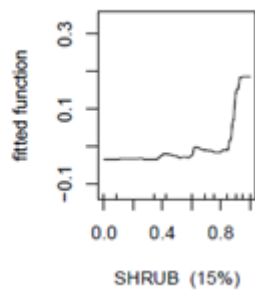
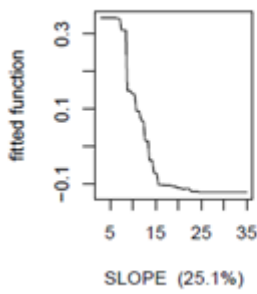
Fig. 2. Distribution spatiale des feux selon leur classification.

BRT

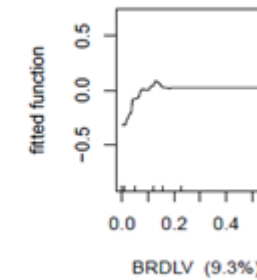
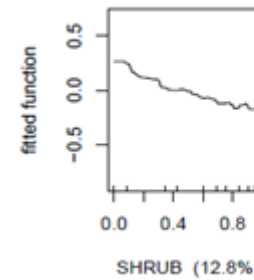
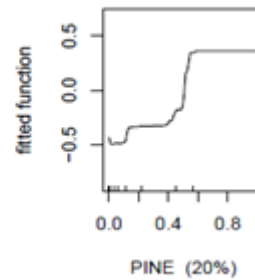
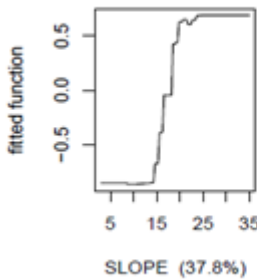
L'effectif des groupes 4 (*Etendu*) et 7 (*Mega*) étant insuffisant pour permettre à la méthode de donner des résultats probants, nous avons regroupé tous les feux de plus de 2000 Ha, soient les groupes *Etendu*, *Rapide et étendu* et *Mega* en un seul groupe qu'on appellera désormais *Très Grand*.

Pour chaque groupe d'incendies sont retenues les quatre variables expliquant la plus grande part de variance (Fig. 3). Les valeurs positives de la fonction ajustée (*fitted function*) pour chaque variable déterminent les plages de valeurs caractérisant le groupe d'incendies concerné. Ainsi, les feux du groupe *Linéaire* sont significativement liés à des pentes faibles (< 12°) avec garrigues abondantes (> 85% soit le quart supérieur de la distribution), vent faible à moyen (<40 km/h) et DC faible (<600 soit le tiers inférieur de la distribution).

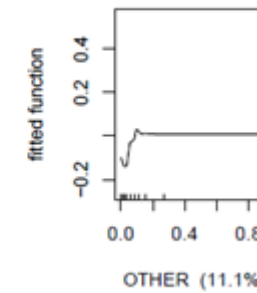
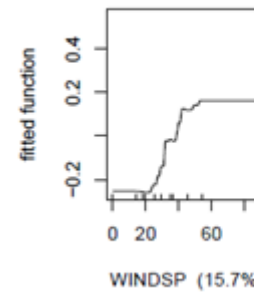
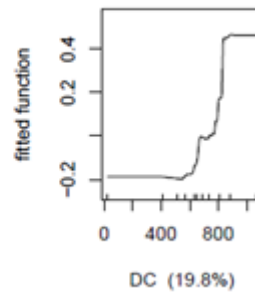
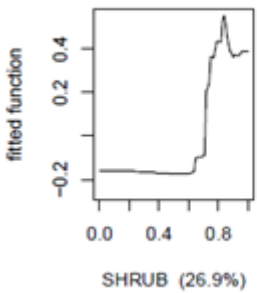
ONEWAY - page 1



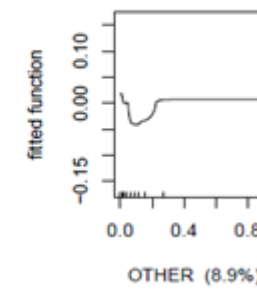
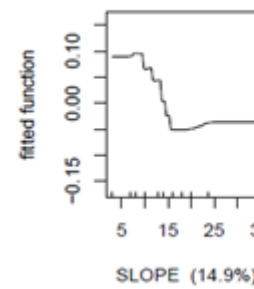
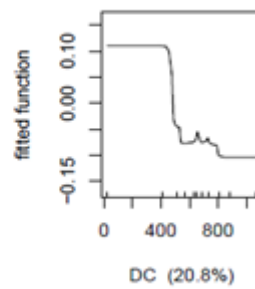
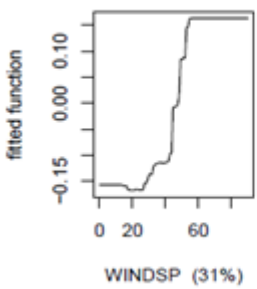
MULTIW - page 1



WINDING - page 1



RAPID - page 1



VERYLARGE - page 1

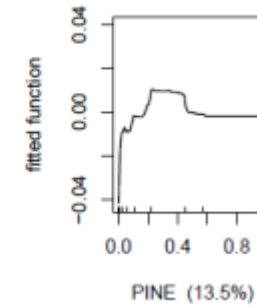
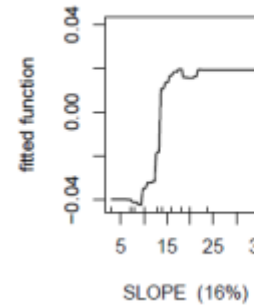
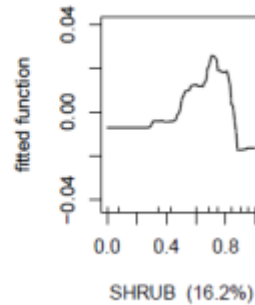
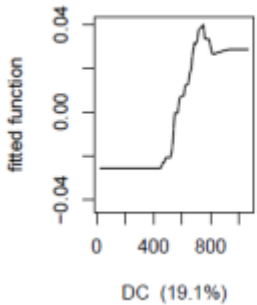


Fig. 3. Variance attribuable aux quatre variables prépondérantes pour chacun des groupes de feu : *Linéaire, Bascule, Enroulement, Rapide* et *Très Grand*.

Le groupe *Bascule* est principalement caractérisé par des pentes fortes ($>17^\circ$ soit le tiers supérieur de la distribution), par plus de 50% de pins et moins de 40% de garrigues. Les feux *Enroulement* sont principalement liés à $>75\%$ de garrigues, $DC > 750$ (extrême, quart supérieur de la distribution) et vent significatif (>30 km/h). Les incendies *Rapide* sont principalement liés à un vent fort (>40 km/h soit le tiers supérieur de la distribution), à un DC modéré (<500) et une pente $<12^\circ$. Enfin, le groupe *Très Grand* est caractérisé par un DC important (>600), un taux de garrigue compris entre 50 et 90 % et une pente faible ($<13^\circ$).

Une clé dichotomique synthétique peut être proposée pour déduire, à partir des données environnementales, le type de feu le plus probable (Fig.4). Un DC faible associé à une pente faible engendrera plutôt un incendie *Linéaire* ou *Rapide* selon la vitesse du vent. Un DC important va donner lieu à un feu *Enroulement* par vent fort et *Très grand* sur pentes marquées. Les pentes importantes vont généralement amener des feux de type *Bascule*.

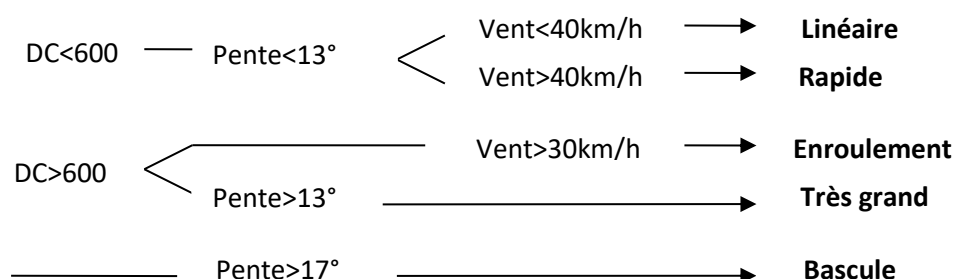


Fig. 4. Type de feu susceptible d'être généré selon les données environnementales.

Véhicules piégés.

Aucun groupe ne possède un ratio d'accident significativement différent du taux moyen de 16% calculé sur la totalité du jeu de données, même avec un intervalle de confiance réduit à 90%. En revanche, l'analyse par zone montre que le risque est plus présent en Provence qu'ailleurs et moins présent en Corse (Tabl. 3).

	Nom	Nb. feux	TRAP ratio	IC 90%
Groupe	Bascule	26	0,11	0,03 – 0,28
	Linéaire	70	0,17	0,09 – 0,23
	Enroulement	16	0	0 – 0,32
	Rapide	16	0,31	0 – 0,32
	Très Grand	25	0,20	0,03 – 0,29
Zone	Corse	48	0,06	0,07 – 0,24
	Maures/Esterel	18	0,11	0 – 0,31

Provence	52	0,27	0,07 – 0,24
Littoral Ouest	18	0,22	0 – 0,31
Montagne	17	0,12	0 – 0,32

Tabl. 3. Ratio d'accident (TRAP) et intervalle de confiance théorique à 90% par groupe et par zone de feu.

Enfin, le test d'homogénéité des moyennes de véhicules engagés selon qu'on a eu des accidents ou pas est rejeté à 99% : $IC_{(p1-p2)} = [31 ; 119]$. On peut donc affirmer qu'il y a plus d'accident lors des incendies où un nombre important de véhicules a été engagé.

Discussion

Une classification adaptée pour la France

L'un des objectifs de cette étude était de voir si les grands incendies du Sud-Est de la France pouvaient faire l'objet d'une classification. Il apparaît que 46% des feux sont de type *Linéaire* et 10% *Enroulement*, ce qui signifie que 56% des incendies sont guidés par un vent de direction constante, qui peut prendre localement une orientation différente en fonction du relief. Une faible part (17%) englobe les feux ayant connu une *Bascule* de vent. Ce phénomène est parfois engendré par les renverses de brises topographiques mais il peut aussi être lié à la situation de cisaillement de vents fréquente sur la zone des Maures/Esterel. Dans un cas comme dans l'autre, une bonne connaissance de la météorologie locale permet d'anticiper le comportement du feu. Enfin, le quart restant (27%) représente les sinistres majeurs: de type *Rapide* ou *Très grand*. Ceux-ci ont atteint une surface ou un rythme d'extension, voire les deux à la fois, les plus importants. Ils constituent les catégories pour lesquelles la lutte est la plus difficile, la moins efficace et la plus dangereuse.

Le but de notre travail va dans le même sens que celui poursuivi en Espagne (Castellnou *et al.* 2010) et, de la même façon, ce sont les feux historiques qui ont servi de base de données. Cependant la méthodologie suivie a été sensiblement différente. Alors que l'équipe espagnole prend en compte la situation météorologique synoptique, nous avons cherché à connaître les paramètres liés à l'indice FWI au plus près de l'incendie. De plus, nous avons fait abstraction des trois grands types de feu usuellement reconnus (Topographiques / Guidés par le vent / Convectifs) pour regarder comment les incendies se répartissent naturellement dans notre zone de recherche, en considérant leurs éventuels changements de direction ainsi que leur rythme d'extension. Les résultats sont probants puisqu'ils introduisent de nouveaux types d'incendies et invitent à poursuivre les recherches, notamment sur les phénomènes explosifs ou convectifs.

L'influence des données environnementales sur la typologie

Les groupes de feux isolés répondent bien à des marqueurs environnementaux différents, notamment l'indice de sécheresse (DC), la vitesse du vent et la pente. L'indice d'humus (DMC), qui n'est le marqueur d'aucun des groupes d'incendie, pourrait donc jouer un rôle uniquement sur les feux de taille inférieure à 200Ha. Cela nécessite néanmoins d'autres études.

Nous n'avons pas conservé la composition du couvert végétal comme facteur déterminant compte tenu que la variable « garrigue » apparaît positivement corrélée à la plupart des groupes de feux. Il ne peut

donc pas s'agir d'un marqueur spécifique. Le groupe *Bascule* fait exception ; le ratio de garrigue est négativement corrélé au groupe alors que les ratios de pins et de feuillus sont positivement corrélés (le signal est très faible pour les feuillus, difficile à interpréter). Finalement, il n'apparaît pas intéressant de considérer le couvert végétal comme marqueur de ce groupe *Bascule*. En effet les zones de montagne sont les plus propices à ce type de feux, guidés par des renverses de vent et ce en raison de l'aérogologie, elle-même résultante de la topographie. Même si ces milieux se trouvent être également les plus riches en couvert forestier de conifères et feuillus, cela n'est manifestement pas ce qui guide le comportement de l'incendie.

La probabilité d'accident liée aux moyens engagés

L'étude ne permet pas de déterminer un type de feu plus propice aux accidents qu'un autre. En revanche, cette probabilité d'accident est positivement corrélée à la quantité de moyens engagés. Cela explique que les accidents sont plus fréquents en zone Provence, où la multitude d'enjeux humains menacés lors d'un incendie engendre un déploiement massif de moyens, et moins fréquents en zone Corse, où le ratio de véhicules de lutte engagés est beaucoup plus faible.

Biais possibles dans les résultats

La classification obtenue s'appuie en partie sur des données extraites de rapports et de témoignages dont on ne peut ignorer la part de subjectivité. Il faut en effet considérer qu'il a été fait appel à des souvenirs pouvant dater de 25 ans pour reconstruire les isochrones par exemple. Cependant la véracité de ces informations orales a généralement été éprouvée en recoupant les témoignages ou en les comparant à des données factuelles archivées. Ainsi les données recueillies lors d'interview manifestement trop approximatifs ont été écartées.

D'autre part, le type de végétation est certainement la moins robuste des variables environnementales compte tenu qu'elle s'appuie sur des couches d'information qui peuvent avoir été dressées jusqu'à 10 ans plus tôt. Dans cet intervalle maximum, des modifications d'usage du sol, tel que l'embroussaillage de parcelles agricoles abandonnées, sont potentiellement intervenues. C'est pourquoi cette donnée de combustible a été interprétée avec prudence, notamment en ce qui concerne le type « autres végétations ».

Conclusion : implications pour la lutte

Cette étude a fourni, à partir de données originales récoltées auprès des intervenants de la lutte, la première classification des grands incendies dans le Sud-est de la France. Nous avons mis en lumière plusieurs groupes de grands feux, caractérisés par leur comportement et leurs marqueurs environnementaux. Ces différents types d'incendies correspondent à différents niveaux de difficulté pour la lutte. Une bonne lecture des marqueurs environnementaux concernés peut permettre de prédire le comportement de certains feux, ce qui permet d'envisager des améliorations dans la sécurité et l'efficacité de la lutte en utilisant cette approche.

Les bases d'une classification étant établies, il sera maintenant intéressant d'approfondir les recherches sur certains types de feux et de chercher notamment les phénomènes « explosifs » ou « convectifs »

afin d'établir leur lien avec l'accidentologie des intervenants. Les prochains travaux devront également s'intéresser à la distribution géographique des différents groupes.

Dans le domaine appliqué, les premières formations d'Analyste du feu sont actuellement en cours en Europe pour les services de lutte. Cette étude participe à fonder les bases de l'enseignement en proposant une typologie reliée à des facteurs environnementaux pour la France méditerranéenne.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches-du-Rhône (SDIS13). Il n'aurait pas été possible sans la collaboration des pompiers et forestiers des Alpes-de-Haute-Provence, des Alpes-Maritimes, de l'Ardèche, de l'Aude, des Bouches-du-Rhône, de Corse, du Gard, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Var qui nous ont transmis leurs précieux témoignages. Nous remercions Marine PASTUREL pour son aide précieuse dans le traitement des données.

- Battesti JP (1992) Projet feux de forêts; rapport d'étape. Ministère de l'intérieur; Direction de la sécurité civile (Paris)
- Castellnou M, Larranaga A, Miralles M, Vilalta O, Molina D (2010) Wildfire Scenarios: Learning from Experience. European Forest Institute (Joensuu)
- Costa P, Castellnou M, Larranaga A, Miralles M, Kraus D (2011) Prevention of large wildfires using the fire types concept. Fire Paradox European Project (Generalitat de Catalunya)
- Curt T, Borgniet L, Bouillon C (2013) Wildfire frequency varies with the size and shape of fuel types in southeastern France: Implications for environmental management. *Journal of Environmental Management* **117**.
- Curt T, Delcros P (2010) Managing road corridors to limit fire hazard: a simulation approach in southern France. *Ecological Engineering* **4**, 1-12.
- Curt T, et al. (2011) Litter flammability in oak woodlands and shrublands of southeastern France. *For. Ecol. Manage.* **261**, 2214-2222.
- De'Ath G (2007) Boosted trees for ecological modeling and prediction. *Ecology* **88**, 243-251.
- Direction de la Sécurité Civile (1994) Guide de stratégie générale pour la protection de la forêt contre l'incendie. Ministère de l'intérieur (Paris)
- Elith J, Leathwick JR, Hastie T (2008) A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* **77**, 802-813.

- Giannakopoulos C, et al. (2012) Comparison of fire danger indices in the Mediterranean for present day conditions. *iforest-Biogeosciences and Forestry* **5**, 197-203.
- Groot WJd, Field RD, Brady MA, Roswintiarti O, Mohamad M (2007) Development of the Indonesian and Malaysian Fire Danger Rating Systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **12**, 165-180.
- Hijmans RJ, Phillips S, Leathwick J, Elith J (2013) dismo: Species distribution modeling. R package version 0.9-3. Publishing)
- Jenks GF (1967) The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography* **7**, 186-190.
- Keeley J, Bond W, Bradstock R, Pausas J, Rundel P (2012) Fire in Mediterranean Ecosystems. Ecology, Evolution and Management. *Cambridge University Press* 450 pp.
- Lampin-Maillet C, Long M, Jappiot M (2008) A Method for Characterising and Mapping Habitat/Forest Interfaces - a Means for Preventing Forest Fires. *Revue Forestiere Francaise (Nancy)* **60**, 363-380.
- Maechler M, Rousseeuw P, Struyf A, Hubert M, Hornik K (2013) cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions.
- Meteo France (2014) <http://www.meteofrance.com>
- Moreira F, et al. (2011) Landscape - wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. *Journal of Environmental Management* **92**, 2389-2402.
- Moriondo M, Good P, Durao R, Bindi M, Giannakopoulos C, Corte-Real J (2006) Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Clim. Res.* **31**, 85-95.
- Pearce J, Ferrier S (2000) Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. *Ecol. Model.* **133**, 225-245.
- Promethee (2014) Base de données sur les incendies de forêt en région méditerranéenne en France depuis 1973. <https://www.promethee.com/>.
- Pyne SJ, Andrews PL, Laven RD (Eds) (1996) 'Introduction to wildland fire.' (John Wiley and Sons Publishing)
- R Core Team (2013) R: A Language and Environment for Statistical Computing. (R Foundation for Statistical Computing Publishing: Vienna, Austria)
- Reynolds A, Richards G, De la Iglesia B, Rayward-Smith V (1992) Clustering rules: A comparison of partitioning and hierarchical clustering algorithms. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* **5**, 475-504
- Ridgeway G, others wcf (2013) gbm: Generalized Boosted Regression Models. Publishing)
- San-Miguel-Ayanz J, Manuel Moreno J, Camia A (2013) Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *For. Ecol. Manage.* **294**, 11-22.
- Sande Silva J, Rego F, Fernandes P, Rigolot E (2010) Towards Integrated Fire Management - Outcomes of the European Project Fire Paradox. (Joensuu)

Van Wagner C (1987) Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System.
Canadian Forestry Service (Ottawa)

Annexe 2:

**Feux avec accident en
Australie étudiés dans le
chapitre II**

Fires with entrapment

Name	Date	State	Sfin	Deat h	Injur	Lost	Time (hours)	Dt	T	H	W	cHaines	ChgBe f	ChgAf t	Slop e	Rugd	D	FFDI	Source		
Waterfall	3-Nov-1980	NSW	2500	5	0	1	1730	14	6	2	39	6	0	0	4	207	9.7	12	Coroners Court of Wollongong 1981;		
Grayspoint	9-Jan-1983	NSW	337	3	6	1	1642	7.5	4	1	35	9	20	1	11	128	9	65	Wilson 1983;		
Lithgow	2-Dec-1997	NSW	15	2	0	0	1445	22	2	1	7	38	0	0	30	246	9	40	RFS NSW Internal investigation		
Wingello	1-Jan-1998	NSW	5	1	7	0	1410	2.8	3	3	5	8	60	0	13	369	10	13	RFS NSW Internal investigation		
Kuring Gai	8-Jun-2000	NSW	6	4	3	0	1415	4	1	5	0	5	4	110	0	20	228	7	3	Stevenson 2001;	
Chilvers lane	4-Dec-2002	NSW	40000	0	0	1	1540	2	3	1	0	37	9	0	0	7	145	8	56	RFS NSW Unpublished Recollection	
Tea Tree	17-Dec-2009	NSW	7000	0	1	1	1530	2.2	2	2	21	12	0	1	19	407	9	19	RFS NSW Internal investigation		
Hawkesbury	10-Sep-2013	NSW	1370	0	2	0	1440	2	3	1	6	40	11	0	0	6	147	8	42	RFS NSW Internal investigation	
Baradine	12-Nov-2013	NSW	146	0	2	1	1515	3.7	2	2	5	1	35	6	0	0	6	84	2	6	RFS NSW Internal investigation
Sturgess	19-Jan-2014	NSW	2510	0	1	1	1500	20	2	3	6	17	11	0	1	19	485	8	10	RFS NSW Internal investigation	

Fortis Creek	26-Oct-2016	NSW	7866	0	0	0	1700	5.7	3	1	8	11	4	0	0	6	136	9	22	RFS NSW Internal investigation	
Uungula	11-Jan-2017	NSW	2835	0	2	1	1615	1	3	2	5	21	10	0	0	6	158	10	26	RFS NSW Internal investigation	
Currandooley	17-Jan-2017	NSW	3386	0	0	0	1400	4	3	2	6	3	26	6	0	0	4	93	7	24	RFS NSW Internal investigation
Sir Ivan	12-Feb-2017	NSW	55372	0	0	0	1145	24	4	1	1	2	39	15	0	1	8	155	10	81	RFS NSW Internal investigation
Carwoola	17-Feb-2017	NSW	3133	0	2	0	1415	4.4	3	1	4	4	37	12	0	0	8	152	10	57	RFS NSW Internal investigation
Mount Bonython	16-Feb-1983	SA	15000	1	4	1	1600	na	4	1	0	4	65	11	100	0	24	351	10	135	Blanchi <i>et al.</i> 2012;
Wangary	11-Jan-2005	SA	77000	2	2	1	1145	21	3	1	5	0	50	11	90	0	2	35	10	92	Schapel 2007; Blanchi <i>et al.</i> 2012;
Greendale	8-Jan-1983	Vic.	19000	2	0	1	1300	na	3	3	9	9	46	10	0	1	7	204	6.9	56	Blanchi <i>et al.</i> 2012; Milligan 1992; CFA 1983;
Beaconsfield	16-Feb-1983	Vic.	9200	12	0	2	2105	5.6	4	1	3	0	70	11	100	0	8	147	10	193	Blanchi <i>et al.</i> 2012;
Cockatoo	16-Feb-1983	Vic.	1800	1	1	1	2107	1.5	4	1	3	0	70	11	100	0	12	195	10	193	State Coroner's Office 2001;
Linton	2-Dec-1998	Vic.	660	5	0	1	2045	8.8	2	2	8	4	44	9	135	0	6	115	6	24	State Coroner's Office 2001;
Linton 1	2-Dec-1998	Vic.	660	0	3	1	1450	2.8	2	2	9	2	45	9	0	1	3	114	9	40	State Coroner's Office 2001;

Linton 2	2-Dec-1998	Vic.	660	0	0	1	1550	5.8	2	2	33	9	0	1	4	100	9	30	State Coroner's Office 2001; CFA internal report CFA internal report CFA internal report CFA int report, McLeod <i>et al.</i> (2010) CFA int report, McLeod <i>et al.</i> (2010) CFA internal report, Cruz <i>et al.</i> 2012; CFA internal report, Cruz <i>et al.</i> 2012; CFA internal report, Cruz <i>et al.</i> 2012; CFA internal report, Cruz <i>et al.</i> 2012; CFA internal report, Cruz <i>et al.</i> 2012;		
Gelantipy	30-Jan-2003	Vic.	1E+06	0	0	0	1630	528	2	4	28	4	110	0	6	266	9	9			
Mansfield	16-Dec-2006	Vic.	2E+06	0	11	0	1410	360	2	2	3	0	0	0	27	500	10	11			
Delburn	30-Jan-2009	Vic.	6400	0	0	0	1500	23	3	2	5	1	25	12	45	0	8	181		9	32
Churchill 1	7-Feb-2009	Vic.	24500	0	1	0	1800	6.5	3	1	7	5	45	12	112	0	9	267		10	74
Churchill 2	7-Feb-2009	Vic.	24500	0	0	0	1800	6.5	3	1	7	5	45	12	112	0	15	347		10	74
Kilmore 1	7-Feb-2009	Vic.	3E+05	0	2	1	1630	4.6	4		0	9	54	12	0	1	6	184		10	124
Kilmore 2	7-Feb-2009	Vic.	3E+05	0	2	0	1640	4.8	4		0	9	54	12	0	1	6	215		10	124
Kilmore 3	7-Feb-2009	Vic.	3E+05	0	3	0	1630	4.6	4		0	9	54	12	0	1	9	254		10	124
Kilmore 4	7-Feb-2009	Vic.	3E+05	0	0	0	1800	6.2	4	1	0	0	37	12	90	0	5	125		10	81
Kilmore 5	7-Feb-2009	Vic.	3E+05	0	0	0	1400	2.1	4	1	2	0	46	12	90	0	8	111	10	106	
Kilmore 6	7-Feb-2009	Vic.	3E+05	0	3	0	1800	6.2	4	1	0	0	37	12	90	0	4	63	10	81	

Kilmore 7	7-Feb-2009	Vic.	3E+05	0	5	1	1830	6.6	2	3	9	4	32	12	90	0	5	232	10	22	CFA internal report, Cruz <i>et al.</i> 2012; CFA int report, McLeod <i>et al.</i> (2010)
Murrindindi	7-Feb-2009	Vic.	2E+05	0	3	1	1900	4	2	3	9	4	32	12	90	0	11	437	10	22	CFA internal report
Vectis	7-Feb-2009	Vic.	2200	0	1	0	1300	0.5	4	8	5	8	63	12	0	1	3	21	10	188	CFA internal report
Murmungee	8-Feb-2009	Vic.	32000	0	0	0	1700	24	3	1	9	8	20	11	0	0	6	361	10	40	CFA internal report
Upwey	23-Feb-2009	Vic.	350	0	9	2	1545	1.3	2	2	9	1	17	6	112	0	9	137	10	24	CFA internal report
Hastings	3-Jan-2015	Vic.	128	0	0	0	1730	3.4	3	3	2	5	22	6	135	0	2	30	7	13	CFA internal report
Scotsburn 1	19-Dec-2015	Vic.	4570	0	0	0	1550	0.8	3	1	9	0	48	10	0	1	5	100	9	91	CFA internal report
Scotsburn 2	19-Dec-2015	Vic.	4570	0	0	0	1700	2	3	2	2	4	24	10	100	0	6	60	9	25	CFA internal report
Barnawartha	20-Dec-2015	Vic.	6700	0	0	0	1525	3.4	4	1	0	5	40	10	0	1	6	169	10	73	CFA internal report
Black Cat Creek	12-Oct-2012	WA	1300	1	3	2	1500	6	3	1	1	7	25	14	90	0	6	63	10	35	Leading Emergency Services 2012; Ferguson 2016;
Waroona	7-Jan-2016	WA	69000	0	0	1	1930	37	3	1	8	5	28	9	20	0	3	77	10	51	

Annexe 3 :

Feux sans accidents utilisés en référence dans le chapitre II

Name	State	Date	Sfin	Slope	Rugd	T	H	W	ChgBef	ChgAft	D	FFDI	cHaines
Gurnang	NSW	20-Mar-1995	5	5	127	23	32	13	0	0	8	10	-2
Bungwahl	NSW	4-Jan-1998	496	2	120	24	70	18	0	0	10	4	3
Neville	NSW	20-Feb-1999	93	10	205	23	37	11	0	0	9	9	9
Paupong	NSW	8-Jan-2003	3×10^5	12	505	13	56	33	0	0	6	4	8
Barigan	NSW	22-Nov-2006	6444	12	219	34	13	30	0	1	10	50	13
Womerah	NSW	11-Dec-2006	15	14	252	35	30	21	0	0	9	21	9
Morton	NSW	28-Aug-2009	8	9	256	24	14	22	0	0	8	23	6
Mororo	NSW	8-Sep-2012	1384	3	39	21	48	11	0	0	9	6	11
Carrai	NSW	21-Oct-2012	8006	9	480	22	73	9	0	0	10	3	9
Kremnos	NSW	7-Jan-2013	2371	12	277	28	45	13	0	0	9	8	0
Dandry	NSW	14-Jan-2013	3389	2	51	29	30	21	0	1	10	19	9
Gunderbooka	NSW	12-Feb-2013	3100	2	15	38	23	24	0	0	10	35	6
Bilpin	NSW	16-Oct-2013	52 779	11	185	17	30	21	0	0	7	9	7
Wirraba	NSW	21-Dec-2013	41 646	8	247	29	27	8	0	0	8	13	8
Colo	NSW	18-Jan-2014	2843	8	239	33	18	9	0	0	9	23	9
Wittitrin	NSW	29-Oct-2014	950	22	378	25	45	21	0	0	10	10	1
Ngarkat	SA	28-Jan-1999	80 000	2	19	35	33	21	0	0	10	21	10
Calperum	SA	14-Jan-2014	48 000	2	38	31	32	46	0	1	10	34	12
Wirrabara	SA	15-Jan-2014	33 000	10	190	42	11	22	0	1	10	59	6
Carina	Vic.	17-Dec-2002	2×10^5	2	17	41	7	11	1	0	10	50	12
Beechworth	Vic.	21-Jan-2003	668	6	252	36	5	30	0	0	10	71	9
Bellfield	Vic.	20-Jan-2006	1×10^5	20	467	25	54	18	0	1	9	6	9
Tarcombe	Vic.	22-Jan-2006	654	4	155	35	23	13	0	1	3	8	9
Dargo	Vic.	1-Dec-2006	6×10^5	17	303	23	17	30	0	0	6	18	4
Wabonga	Vic.	1-Dec-2006	3×10^5	11	269	16	34	13	0	0	6	5	4
Bogong	Vic.	10-Dec-2006	31 000	27	672	22	16	28	0	0	7	20	14
Lillimur	Vic.	31-Dec-2006	7533	3	17	22	56	31	0	0	8	6	6

Minimay	Vic.	1-Jan-2007	646	2	14	22	73	9	0	0	10	3	5
Archerton	Vic.	11-Jan-2007	30 600	18	295	26	18	26	0	0	8	24	7
Lawloit	Vic.	7-Dec-2007	6465	2	25	24	30	35	0	0	9	20	3
Wingan	Vic.	16-Jan-2010	6300	9	109	29	55	8	0	0	9	5	8
Underbool	Vic.	14-Mar-2010	349	4	47	29	25	15	0	0	10	20	6
Smoko	Vic.	25-Mar-2010	2310	20	608	13	69	42	0	0	4	2	10
Bolwarrah	Vic.	14-Dec-2010	128	4	72	24	39	18	0	0	5	6	5
Wombat Creek	Vic.	1-Feb-2011	10 992	4	40	39	19	17	0	1	8	29	8
Wroxham	Vic.	27-Feb-2011	4593	26	664	19	91	17	0	0	8	1	1
Yangoura	Vic.	17-Jan-2013	86 593	20	358	23	28	15	0	0	9	13	10
Wollert	Vic.	18-Feb-2013	1903	1	47	30	27	22	0	0	10	22	9
Corindhap	Vic.	27-Mar-2013	1296	7	102	33	19	30	0	1	9	36	8
Yaapeet	Vic.	14-Jan-2014	51 600	1	38	43	9	21	0	1	10	63	12
Goongerah	Vic.	16-Jan-2014	50 103	7	147	31	39	1	0	0	9	8	10
Wartook	Vic.	29-Jan-2014	54 600	4	178	25	36	30	0	0	10	17	6
Forbes	Vic.	9-Feb-2014	22 830	3	159	21	42	35	0	0	10	13	3
Moyston	Vic.	2-Jan-2015	4455	5	76	31	14	28	0	0	7	29	12
Northcliffe	WA	29-Jan-2015	95 000	7	99	19	91	21	0	0	4	1	10

Annexe 4 :

**Accidents étudiés dans le
chapitre III**

Name	Date	State	Deaths	Injuries	GrowthRate	FWI	Wind	Ruggedness	Type	Shift	VLS	VLSdi stance	Attachment	Canyon
Aix05	06/08/2005	FR	0	0	38	39	40	132	T2	0	0	0	0	0
Alajar99	30/06/1999	SP	4	0	30	43	3	404	T1	1	0	0	1	1
Armi10	29/07/2010	FR	0	0	33	79	35	130	T2	0	0	0	0	0
Artemida07	24/08/2007	GR	3	0	1500	94	12	457	T3	0	0	0	1	0
Auron91	19/08/1991	FR	0	0	20	39	32	175	T2	0	0	0	1	0
Barnawartaha	20/12/2015	VIC	0	0	1176	171	40	169	T3	0	0	0	0	0
Barret90	21/09/1990	FR	0	6	214	64	55	261	T3	0	1	1300	0	0
Beaconsfield	16/02/1983	VIC	12	0	714	435	70	147	T3	1	1	1000	1	0
BlackCatCreek	12/10/2012	WA	1	3	166	88	25	63	T2	1	0	0	0	0
Boni94	10/08/1994	FR	0	0	1538	73	20	220	T2	0	0	0	0	0
Bonson94	11/08/1994	FR	0	0	17	69	18	704	T1	0	0	0	1	1
Bormes90	21/06/1990	FR	4	1	20	37	30	195	T1	0	0	0	1	1
Bucklands crossing	24/03/1998	NZ	0	4	26	28	17	215	T2	0	1	0	1	1
Cabrier04	27/07/2004	FR	0	1	83	85	40	124	T2	0	0	0	0	0
Cannet03	01/09/2003	FR	3	0	42	73	20	239	T3	0	1	1300	1	1
Carwoola	17/02/2017	NSW	0	2	182	137	37	152	T2	0	1	1000	0	0
Cerbere15	18/09/2015	FR	1	0	25	18	19	428	T2	0	0	0	1	1
Chatea10	24/07/2010	FR	0	0	117	98	45	124	T2	0	0	0	0	0
Chilverslane	04/12/2002	NSW	0	0	700	135	37	145	T3	0	0	0	0	0
Churchill1	07/02/2009	VIC	0	1	1538	173	45	267	T3	1	1	700	0	0
Churchill2	07/02/2009	VIC	0	0	1538	173	45	347	T3	1	1	0	0	1
Cockatoo	16/02/1983	VIC	1	1	60	435	70	195	T3	1	1	1300	1	0
Collo90	21/08/1990	FR	0	7	50	51	40	353	T2	0	0	0	1	1
Cornil00	08/07/2000	FR	2	0	150	65	50	157	T2	0	0	0	0	0
Correns16	18/07/2016	FR	0	0	10	76	22	161	T2	0	1	0	0	0
Currandooley	17/01/2017	NSW	0	0	625	65	26	93	T2	0	0	0	0	0
Delburn	30/01/2009	VIC	0	0	87	80	25	181	T3	0	0	0	0	0
Ensues16	15/07/2016	FR	0	0	48	100	43	112	T2	0	1	0	0	1
Eygal89	09/10/1989	FR	0	0	9	59	50	250	T2	0	1	0	0	0
Famal06	09/07/2006	PO	6	0	234	64	5	455	T1	1	0	0	1	1
FortisCreek	26/10/2016	NSW	0	0	105	59	11	136	T2	0	0	0	0	0
Gelantipy	30/01/2003	VIC	0	0	871	26	28	266	T3	1	0	0	0	0
Gordes87	21/07/1985	FR	1	1	15	92	18	222	T2	0	0	0	0	0
Grayspoint	09/01/1983	NSW	3	6	40	153	35	128	T2	0	1	900	0	0
Greendale	08/01/1983	VIC	2	0	na	135	46	204	T3	0	0	0	1	0
Grimaud85	06/08/1985	FR	1	0	63	39	40	340	T2	0	1	0	1	1

Guadal05	17/06/2005	SP	11	1	88	NA	NA	251	T3	0	0	0	1	1
Hastings	03/01/2015	VIC	0	0	29	36	22	30	T2	1	0	0	0	0
Hawkesbury	10/09/2013	NSW	0	2	300	102	40	147	T2	0	1	600	0	0
Hiruela92	19/09/1992	SP	5	0	290	NA	NA	506	T1	0	0	0	1	1
Horta09	21/07/2009	SP	5	1	7	68	30	603	T1	0	0	0	1	1
Hymetus98	22/07/1998	GR	4	0	40	NA	NA	578	T2	0	1	0	1	1
Kilmore1	07/02/2009	VIC	0	2	3260	284	54	184	T3	0	0	0	0	0
Kilmore2	07/02/2009	VIC	0	2	3125	284	54	215	T3	0	0	0	0	0
Kilmore3	07/02/2009	VIC	0	3	3260	284	54	254	T3	0	0	0	0	0
Kilmore4	07/02/2009	VIC	0	0	4516	188	37	125	T3	1	0	0	0	0
Kilmore5	07/02/2009	VIC	0	0	952	245	46	111	T3	0	0	0	0	0
Kilmore6	07/02/2009	VIC	0	3	4516	188	37	63	T3	1	0	0	0	0
Kilmore7	07/02/2009	VIC	0	5	6818	58	32	232	T3	1	0	0	0	0
Kornati07	30/08/2007	CR	12	1	205	67	35	200	T3	0	1	0	1	1
KuringGai	08/06/2000	NSW	4	3	1	9	5	228	T1	1	0	0	1	0
Lafar03	14/08/2003	FR	0	0	14	45	1	572	T1	0	0	0	0	0
Lamb03	30/07/2003	FR	1	1	57	52	15	191	T2	0	0	0	1	1
Lancon95	28/08/1995	FR	2	10	10	80	55	102	T2	0	0	0	1	0
Lecci89	28/08/1989	FR	0	0	88	43	32	116	T2	0	0	0	0	0
LeRov04	24/07/2004	FR	0	4	40	119	65	191	T2	0	1	400	0	1
LeRov04b	24/07/2004	FR	0	1	160	119	65	161	T2	0	1	200	0	0
LesPen03	18/06/2003	FR	0	0	67	147	29	274	T2	0	1	0	0	0
LesPen89	14/02/1989	FR	1	1	9	36	35	183	T1	0	0	0	1	0
LesPen90	10/07/1990	FR	0	0	20	59	60	222	T2	0	1	0	0	0
Linton	02/12/1998	VIC	5	0	68	63	44	115	T2	1	0	0	0	0
Linton1	02/12/1998	VIC	0	3	25	99	45	114	T2	0	0	0	0	0
Lithgow	02/12/1997	NSW	2	0	1	99	38	246	T1	0	0	0	1	1
Lithgow2	02/12/1997	NSW	0	0	1	99	38	246	T2	0	1	0	0	0
Lumio03	12/08/2003	FR	0	0	80	75	18	350	T1	0	0	0	1	1
MannGulch	05/08/1949	US	13	0	80	90	30	480	T1	0	0	0	1	1
Mansfield	16/12/2006	VIC	0	11	na	32	3	500	T1	0	0	0	1	1
Marseille89	28/08/1989	FR	0	0	19	74	75	163	T2	0	0	0	0	0
Mart02	25/07/2002	FR	0	0	57	116	50	179	T2	0	0	0	0	0
Meria89	31/07/1989	FR	0	0	75	61	90	435	T3	0	1	0	1	1
Molina11	18/10/2011	SP	1	0	7	16	10	640	T1	0	0	0	1	1
Morgiou79	18/08/1979	FR	2	0	10	58	35	275	T2	0	1	0	1	1
Mouries98	08/07/1998	FR	0	4	7	49	13	198	T2	0	0	0	0	0
MtBonython	16/02/1983	SA	1	4	na	308	65	351	T3	1	1	700	1	1
Murmungee	08/02/2009	VIC	0	0	1059	98	20	361	T3	0	1	1000	0	0
Murrindindi	07/02/2009	VIC	0	3	13750	58	32	437	T3	1	1	600	0	0

Ollioules8														
7	05/08/1987	FR	0	2	45	84	40	300	T2	0	0	0	1	1
Orgon12	26/08/2012	FR	0	0	17	29	25	195	T2	0	1	0	0	1
Palasca00	17/09/2000	FR	2	5	4	40	47	291	T1	0	0	0	1	1
PDB00	19/08/2000	FR	0	0	10	45	15	60	T2	0	0	0	0	0
Pieve05	01/07/2005	FR	0	0	21	67	18	529	T2	0	0	0	1	1
Puylob8														
6	24/08/1986	FR	1	0	200	45	35	521	T3	0	1	550	0	0
Scotsburn														
1	19/12/2015	VIC	0	0	575	210	48	100	T3	0	0	0	0	0
Scotsburn														
2	19/12/2015	VIC	0	0	2000	66	24	60	T3	1	0	0	0	0
Sirlvan	12/02/2017	NSW	0	0	85	190	39	155	T3	0	0	0	0	0
SouthCan	06/07/1994	US	14	0	16	114	45	770	T1	1	0	0	1	1
StAndr08	28/08/2008	FR	0	0	239	58	20	183	T2	0	0	0	0	1
SteMax82	21/08/1982	FR	0	0	80	168	35	436	T3	0	1	0	0	1
Sturgess	19/01/2014	NSW	0	1	47	27	17	485	T2	0	1	0	1	1
StZac06	21/07/2006	FR	0	0	14	48	11	334	T2	0	0	0	1	1
Tanner85	31/07/1985	FR	5	0	27	75	25	358	T2	1	0	0	1	1
TeaTree	17/12/2009	NSW	0	1	454	52	21	407	T2	0	0	0	1	1
Torderes8														
1	24/08/1981	FR	1	0	30	61	45	147	T2	0	0	0	0	0
Trets89	01/08/1989	FR	0	0	180	70	30	233	T3	0	1	1000	0	0
Upwey	23/02/2009	VIC	0	9	11	63	17	137	T2	1	0	0	0	0
Vectis	07/02/2009	VIC	0	1	180	424	63	21	T3	0	0	0	0	0
Velaux04	24/07/2004	FR	0	0	250	180	55	185	T2	0	0	0	0	1
Velaux95	23/06/1995	FR	0	1	75	62	58	183	T2	0	0	0	1	0
Vileve10	30/08/2010	FR	0	0	78	31	23	67	T2	0	0	0	0	0
Wangary	11/01/2005	SA	2	2	95	214	50	35	T3	1	0	0	0	0
Waroona	07/01/2016	WA	0	0	946	124	28	77	T3	0	0	0	0	0
Waterfall	03/11/1980	NSW	5	0	21	33	39	207	T2	0	0	0	0	0
Wingello	01/01/1998	NSW	1	7	2	35	5	369	T1	1	0	0	1	0

Résumé

En dépit de moyens importants consacrés à la lutte, certains feux de forêt, en Europe méditerranéenne, en Australie ou en Amérique du Nord, parcourent de grandes surfaces et développent des comportements violents qui piègent les pompiers. L'étude de rapports internes aux services d'incendie révèle ici les conditions météorologiques et topographiques dans lesquelles se produisent ces feux dangereux.

En France, alors que le vent violent est le principal contributeur des feux les plus grands et les plus dangereux, les températures élevées mènent à un autre type d'incendies violents qui se propagent rapidement.

En Australie, les pompiers sont souvent piégés par une bascule brutale de la direction du vent mais aussi par des vents forts en terrain accidenté.

Au-delà des disparités intercontinentales, la recherche des comportements dynamiques de feu impliqués dans plus de 100 accidents de pompiers à travers le monde amène à distinguer trois types d'incendie. Lors des feux topographiques, en zone de montagne, les accidents sont généralement causés par l'attachement de la flamme sur des pentes supérieures à 20°. Lors des feux guidés par le vent, les zones les plus propices aux accidents sont les pentes déventées où des effets de vortex peuvent se produire. Enfin, lors des feux convectifs, les plus violents, les accidents peuvent se produire loin de toute configuration dangereuse.

Pour tenir compte de ces résultats et améliorer leur sécurité, les pompiers doivent adapter leur formation et de développer des compétences d'analyste du feu. Ces experts intégreront les retours d'expérience des incendies passés pour proposer les stratégies de lutte les plus efficaces et sécurisées.

Mots Clés

Accident, Analyste du feu, Comportement du feu, Convectif, Feu de forêt, Incendie, Météorologie, Pompiers, Propagation, Sécurité, Topographie, Vent, Vortex.

Abstract

Despite the large expenditure that is dedicated to forest fire suppression in Euro-Mediterranean countries, Australia and North-America, firefighters still face large and severe fire events which eventually entrap them. Investigation of Fire Services' internal reports addresses here the weather and terrain leading to these dangerous fires.

In France, strong wind is the main driver of the largest fires and of the fires that entrap firefighters. However, high temperature is also a key contributor as it influences violent fires with high rates of surface spread.

In Australia, a lot of firefighters' entrapments are due to shifts in wind direction, but others are associated to strong winds in rugged terrain.

Whatever the regional specificities, more than 100 firefighters' entrapments across the world were investigated to find the contribution of dynamic fire behaviors in these entrapments. The results return three different types of fires. During topography-influenced fires, in mountainous area, almost all the entrapments happen on slopes steeper than 20°, prone to flame attachment. During wind-driven fires, leeward slopes prone to vorticity-driven lateral fire spread are the most prominent configurations associated with entrapments. Finally, during convective fires, which are the most violent, entrapments can happen far away from any dangerous configuration.

Firefighters should adjust their training courses and promote fire behavior analysts (FBAN) capabilities to benefit from the results of this work and improve their safety. FBAN may consider feedbacks from previous fires to suggest the most efficient and secure firefighting strategies and locations.

Keywords

Bushfire, Convective fire, Entrapment, Fire Behavior Analyst, Firefighters, Fire Weather, Forest fire, Propagation, Safety, Terrain, Topography, Vorticity Lateral Spread, Wildfire, Wind.