



Modélisation du risque d'incendie de forêt dans les interfaces habitats-forêts

C. Lampin, M. Jappiot, J.P. Ferrier

► To cite this version:

C. Lampin, M. Jappiot, J.P. Ferrier. Modélisation du risque d'incendie de forêt dans les interfaces habitats-forêts. Sciences Eaux & Territoires, 2011, Hors série 2011, 12 p. 10.14758/SET-REVUE.2011.HS.03 . hal-00652743

HAL Id: hal-00652743

<https://hal.science/hal-00652743>

Submitted on 16 Dec 2011

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

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

Sciences Eaux & Territoires

La revue d'Irstea

Article hors-série numéro 3

Modélisation du risque incendie de forêt dans les interfaces habitats-forêts

Corinne LAMPIN, Marielle JAPPIOT et Jean-Paul FERRIER


www.set-revue.fr

Sciences Eaux & Territoires La revue du Cemagref

Recherche avancée

Accueil

Derniers numéros
Les éco-indicateurs au service de l'agriculture durable
Politiques publiques et biodiversité
Public policy and biodiversity
Risques naturels en montagne
L'évaluation du risque horticole dans les milieux aquatiques

À propos de la revue
Présentation
Instructions aux auteurs
Archives
Sciences Eaux & Territoires
Ingénieries EAT
Contacter la rédaction

Politiques publiques et biodiversité
Problématiques scientifiques, enjeux politiques et actions locales

Sciences Eaux & Territoires

Pourquoi un tel numéro ? 2010 : année mondiale de la biodiversité Une année pour « révéler » les connaissances internationales et nationales face à la perte de la diversité biologique : en effet la lutte contre l'érosion de la biodiversité est devenue au R. Un enjeu.

Sommaire
► Editorial : 2010, un nouveau départ pour la biodiversité ?
► Quelques réflexions sur la notion de biodiversité
► Les valeurs de la biodiversité dans les sites et corridors internationaux
► La construction de la biodiversité comme problème politique et scientifique, premiers résultats d'une enquête en cours

Voici le sommaire complet

Politiques publiques et biodiversité
n°03
22 Octobre 2010

Autres numéros SET / Archives Ingénieries EAT

English | Alertes mail | Abonnement RSS

Alertes mail
Pour se tenir informé des nouveaux articles parus des leur mise en ligne...
[S'abonner](#)

En ligne...
10 Mars 2011
Les numéros en ligne actuellement [lire la suite](#)

Le Cemagref
10 Mars 2011
Le Cemagref a 30 ans

30 ans
1981-2011
Cemagref

Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 3 – 2011

Directeur de la publication : Roger Genet

Directeur éditorial : Nicolas de Menthiera

Comité éditorial : Jacques Bories, Sylvane Casademont,

Denis Cassard, Camille Cédra, Catherine Fouchier,

Jean-Joël Gril, Alain Hénaut, Bruno Hérault,

Emmanuelle Jannès-Ober, Philippe Jannot, André Le Bozec,

Éric Maillé, Gwenael Philippe, Christian Rigaud et Michel Vallance.

Rédactrice en chef : Caroline Martin

Secrétariat de rédaction et mise en page : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : CBat

Contact édition et administration :

Irstea-DPV – BP 44 – 92163 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : set-revue@irstea.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution

N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : V. La Chanonie (Irstea-Cemagref)

Pour mieux
affirmer
ses missions,
le Cemagref
devient Irstea.



Modélisation du risque incendie de forêt dans les interfaces habitats-forêts

En région méditerranéenne, les forêts sont régulièrement la proie des flammes, avec des conséquences écologiques, économiques et sociales souvent désastreuses. Les zones où l'habitat est en contact étroit avec la forêt représentent plus particulièrement un danger et deviennent une véritable préoccupation pour les gestionnaires, qui ont besoin d'outils de localisation pour agir et limiter les risques d'incendies dans ces territoires. Cet article nous présente une méthode innovante d'évaluation du risque fondée sur l'observation et la description ainsi que sur une analyse spatiale et statistique de ces zones à risque.

Les incendies de forêt affectent de grandes surfaces et causent d'importants dommages qui peuvent avoir de lourdes conséquences écologiques, sociales et économiques. Plus de cinquante mille feux brûlent environ cinq cent mille hectares de végétation chaque année dans les pays du bassin méditerranéen européen (photo ①). Les interfaces habitat-forêt sont directement concernées par ces incendies : 90 % des départs de feux sont liés à l'activité humaine en Europe méditerranéenne, et chaque année de nombreux morts sont à déplorer à cause de ces incendies de forêt parmi les habitants des interfaces habitat-forêt. Dans le contexte d'une forte pression d'urbanisation et d'une accumulation de biomasse combustible, ces interfaces habitat-forêt représentent donc une véritable préoccupation pour la gestion du risque d'incendie, particulièrement au regard de ses deux composantes : l'aléa en termes de départs de feu causés par les activités humaines, et la vulnérabilité, en termes de surfaces brûlées menaçant les zones habitées ou endommageant les bâtis.

Malgré les fortes préoccupations que causent les interfaces habitat-forêt, notamment en matière de gestion du territoire et de gestion de l'incendie, les données sur leur localisation sont imprécises et celles sur leur extension sont rares. Comme le soulignent Theobald et Romme (2007), des cartographies plus détaillées d'interfaces habitat-forêt permettraient d'utiliser les cartes produites à des fins d'activité de gestion et de prévention, mais aussi de prospective sur leur développement futur. Le développement d'une méthode efficace pour cartographier précisément les interfaces habitat-forêt serait nécessaire pour la gestion du risque d'incendie.

Ce risque d'incendie de forêt est une réalité en région méditerranéenne française. Son intégration dans la gestion et l'aménagement du territoire est devenue incontournable. Cette intégration du risque doit s'appuyer sur des actions conjointes :

- de gestion et de protection des massifs forestiers à travers leur aménagement ;
- de planification et de réglementation pour maîtriser l'urbanisation avec la prise en compte du risque d'incendie dans l'aménagement des zones urbaines ;
- de maîtrise de l'utilisation du foncier localement pour la protection ou la mise en valeur d'espaces menacés par un risque d'incendie de forêt.

Mais elle nécessite, pour être réussie, une évaluation spatiale du risque d'incendie avec sa cartographie qui doit s'orienter vers une approche globale se dégageant de la combinaison classique, mais trop souvent difficile à mettre en œuvre, de l'aléa et de la vulnérabilité..

La cartographie des interfaces habitat-forêt, un préalable à une approche globale de modélisation du risque

Il y a de nombreuses manières de définir les interfaces habitat-forêt, mais l'interface habitat-forêt est désormais le plus communément définie comme une zone où des dispositifs de développement humain se mélangent avec la végétation naturelle, comme une aire où les habitations ou autres activités humaines sont situées dans ou au contact d'une végétation combustible. La définition développée dans l'article s'appuie sur l'existence de la loi d'orientation forestière du 11 juillet 2001 (Art. 322.3) qui impose l'obligation de débroussailler dans un rayon



➊ Plus de cinquante mille feux brûlent environ cinq cent mille hectares de végétation chaque année dans les pays du bassin méditerranéen européen.

de cinquante mètres minimum autour des bâtis situés à moins de deux cents mètres de forêts, garrigues ou maquis. L'interface habitat-forêt est délimitée par la surface dessinée par un rayon de cent mètres autour des seuls bâtis de type résidentiel situés à moins de deux cents mètres de tout massif forestier ou garrigues, maquis qu'ils soient occupés de façon permanente, temporaire ou saisonnière. Cette définition conduit à élaborer une typologie d'interfaces habitat-forêt en fonction des parts relatives des systèmes « habitation » et systèmes « forêt ou autre espace naturel » et du niveau d'imbrication de leurs structures.

La première hypothèse est de considérer que l'organisation de l'habitat résidentiel, sa structure spatiale a une influence sur le niveau de risque d'incendie. Selon sa nature – isolé, diffus ou groupé – la pression anthropique sera différente sur l'environnement, les enjeux seront plus ou moins importants en cas d'incendie, etc.

La seconde hypothèse est de prendre en compte la structure horizontale de la végétation localisée en interface. L'analyse des retours d'expériences après incendie montre en effet que la structure de la végétation prime sur sa nature dans la propagation d'un incendie de forêt. Une végétation éparse aura pour effet d'atténuer l'intensité d'un feu, de freiner sa propagation du fait d'une rupture dans la continuité de la végétation. Au contraire, une végétation compacte et continue alimentera le feu et lui maintiendra un niveau d'intensité critique jusqu'aux abords d'un bâti. Même si la structure verticale de la végétation joue un rôle également dans la propagation d'un feu en permettant le transfert du feu d'une végétation enflammée au sol jusqu'à la cime des arbres en cas de continuité verticale de la végétation, elle ne sera pas prise en compte dans l'approche spatiale.

La caractérisation et la cartographie des interfaces habitat-forêt a donc supposé de faire le choix de critères pertinents et quantifiables. Quatre types de structure d'habitat résidentiel (habitat isolé I, diffus D, groupé dense GD et groupé très dense GTD) ont ainsi été définis, fondés sur des notions de distances entre bâtis et de regroupement de ces bâtis. Trois types de structure horizontale de végétation ont été identifiés (végétation continue et compacte, végétation éparse et discontinue, végétation absente) selon les valeurs fortes, faibles à nulles d'un indice d'agrégation calculé sur cette végétation. La combinaison de ces critères a conduit à construire une typologie d'interfaces habitat-forêt en douze types (Lampin-Maillet *et al.* 2010a).

L'objectif de l'article est de présenter une méthode innovante d'évaluation du risque global d'incendie. Celle-ci s'appuie sur une démarche de recherche qui a consisté à mettre en relation l'organisation spatiale du territoire lue à travers la cartographie des interfaces habitat-forêt et l'historique des incendies de forêt, fondée sur l'hypothèse que le risque d'incendie est lié à la structure spatiale du territoire selon des relations stables et reproductibles. Le risque d'incendie a été appréhendé en termes de distribution spatiale des points de dépôts de feu, des incendies et des surfaces brûlées correspondantes.

Méthodologie

Site d'étude

L'étude a été conduite sur une zone située dans le Sud-Est de la France entre les métropoles d'Aix-en-Provence et de Marseille dans le département des Bouches-du-Rhône

(figure 1). Ce site d'étude s'étend sur 167 736 ha couvrant 59 communes : 60 % de la zone est occupée par des espaces forestiers, 20 % par des espaces urbains et 20 % par des espaces agricoles (OccsolSPOT 5, 2003). Il connaît un haut niveau d'urbanisation et de pression urbaine (420 hab/km²). Les interfaces habitat-forêt y sont très communes. L'extension urbaine occupe peu à peu les anciennes terres agricoles désormais en jachère, mais elle est également marquée aux limites, voire au cœur des massifs forestiers.

Carte de types de territoire dérivée de la carte des interfaces habitat-forêt, indispensable aux analyses

Une carte des interfaces habitat-forêt a été réalisée sur la zone d'étude en appliquant la méthode développée dans Lampin-Maillet *et al.* (2010a). Elle est à ce jour facilement réalisable avec l'appui du guide méthodologique (Lampin-Maillet *et al.*, 2010b) et à l'aide de l'outil WUImap (Lampin-Maillet et Bouillon, 2011). Cette cartographie des interfaces habitat-forêt a produit une nouvelle carte du territoire. En effet, le territoire s'est trouvé compartimenté selon une nouvelle clé de lecture : les espaces dits « interfacés » (interfaces habitat-forêt avec une différenciation selon la typologie d'interfaces élaborée en douze types), et les espaces dits « non interfacés » (espaces bâtis hors interfaces – O – et le reste du territoire – R) (figure 2, O=OWUI sur carte et R=REST sur carte).

Cette carte produite au format raster a été convertie au format vecteur pour les besoins de l'analyse, produisant ainsi 10 487 polygones affectés aux différents types de territoires (I, D, GD, GTD, O, R). Le territoire s'est ainsi trouvé découpé en unités spatiales représentées par chacun des polygones. Seuls 2 961 polygones ont été conservés pour les besoins des analyses statistiques avec une surface de plus de 31 400 m² (surface jugée significative correspondant à celle d'une interface habitat-forêt en habitat isolé). Ces polygones représentent 95 % de la surface de la zone d'étude, leur nombre est suffisant pour permettre une analyse statistique pertinente en utilisant le logiciel Statgraphics et une analyse spatiale en utilisant ArcGis 9.2.

Variables étudiées

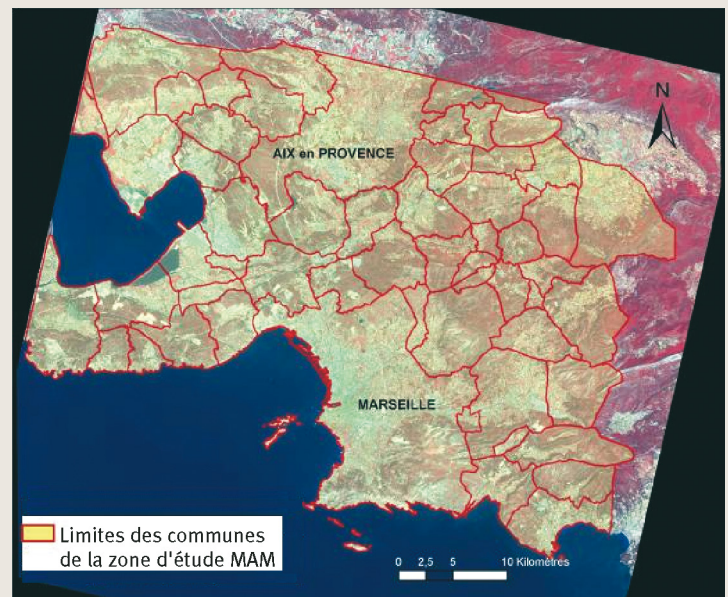
La nature et l'origine des variables à expliquer et explicatives de la matrice d'analyse sont définies ci-après.

Variables à expliquer : indicateurs de risque d'incendie

Trois variables à expliquer ont été définies :

- la densité des points d'éclosion DE. Elle a été calculée comme le ratio du nombre de départs de feu cumulé sur la période 1997-2007 inclus dans un polygone sur la surface de ce polygone. Pour éviter le biais occasionné par la variabilité des surfaces de chaque polygone, la densité a été choisie, et non le nombre ;
- la densité d'incendie de forêt DI. Elle a été calculée comme le ratio du nombre d'incendies de forêt cumulé sur la période 1990-2007 ayant parcouru le polygone sur la surface de ce polygone. Comme pour l'indicateur précédent, la densité a été choisie ;
- le taux de surfaces brûlées du polygone SB. Il a été calculé comme le ratio de la somme des surfaces brûlées (1 à 4 fois) intersectant un polygone sur la surface de ce polygone.

1 Zone d'étude entre les métropoles Aix-en-Provence et Marseille.



Fonds Spot 5 2.5 m, Aix-Marseille, août 2002.
© CNES 2002 – Distribution Spot Image.

Pour calculer ces variables, la base de données géo-référencées de départs de feu, fournie par l'agence départementale de l'Office national des forêts des Bouches-du-Rhône (ONF 13) a fourni les 565 points d'éclosion localisés sur la zone d'étude sur la période 1997 à 2007. Les contours des surfaces incendiées sont quant à eux issus d'une base de données géo-référencées DDAF 13/ONF 13, ils concernent les feux de plus de 10 ha recensés de 1960 à 2007 et les sautes associées d'une surface généralement inférieure à 1 ha. Dans l'étude, seuls les feux de 1990 à 2007 ont été pris en compte de façon à rendre acceptable l'hypothèse d'une évolution modérée de l'occupation du sol et de mettre en relation la surface brûlée avec le territoire existant.

Variables explicatives

Onze variables portant sur l'environnement naturel et humain ont été extraites à partir des bases de données disponibles.

Parmi les variables de nature anthropique, le « Type de territoire » identifie le type de territoire auquel chaque polygone appartient parmi les six possibles (interface en habitat isolé, en habitat diffus, en habitat groupé dense, en habitat groupé très dense, habitat hors interface, reste du territoire). Cette variable prend la valeur de 100 % si le polygone appartient au type de territoire concerné sinon 0 %. Le « Type d'occupation du sol » spécifie la nature de l'occupation du sol parmi les cinq types identifiés (zone urbaine, champs cultivé, forêt, garrigue, installation de loisir). Cette variable s'exprime en pourcentage de surface de chaque type d'occupation du sol représenté dans le polygone. Les « Densité du bâti », « Densité de routes » et « Densité de chemins » sont calculées pour chaque polygone respectivement comme le nombre de bâtis, de kilomètres de routes et kilomètres de chemins divisé par la surface de chaque polygone. Elles sont exprimées

comme le nombre de bâtis par km², le nombre de kilomètres de routes par km² et le nombre de kilomètres de chemins par km².

Parmi les variables relatives à l'environnement naturel, la « Pente » détermine la pente moyenne du polygone exprimée en pourcentage. L'« Exposition au vent » définit la classe d'exposition au vent calculée en prenant en compte une direction générale de vent de mistral occasionnant ainsi trois situations « sous le vent, neutre, au vent ». Cette variable s'exprime en pourcentage de surface de chaque type d'exposition au vent représenté dans le polygone. L'« Altitude » est l'altitude médiane du polygone exprimée en mètres. L'« Exposition à la chaleur » définie par l'indice de Becker qualifie une aire de « très fraîche, fraîche, neutre, chaude ou très chaude ». Cette variable s'exprime en pourcentage de surface de chaque type d'exposition à la chaleur représenté dans le polygone. Le « Type de végétation » détermine l'état de la végétation parmi les cinq types : feuillus, résineux, peuplements mixtes, garrigues et végétation absente. Cette variable s'exprime en pourcentage de surface de chaque type de végétation représenté dans le polygone. Enfin l'« Agrégation de la végétation » traduit la structure horizontale de la végétation à travers les trois classes de valeurs de l'indice d'agrégation : végétation arborée, arbustive absente correspondant à des valeurs nulles de l'indice d'agrégation, végétation éparse et discontinue correspondant à des valeurs faibles de l'indice, végétation compacte et continue correspondant à des valeurs fortes de l'indice. Cette variable s'exprime en pourcentage de surface de chaque type d'agrégation de la végétation représenté dans le polygone.

Les analyses statistiques mises en œuvre

Les valeurs des variables, variables à expliquer et explicatives, ont été calculées pour chacun des 2 961 polygones après avoir réalisé divers traitements sur les données géo-référencées en utilisant le logiciel ArcGis 9.2.

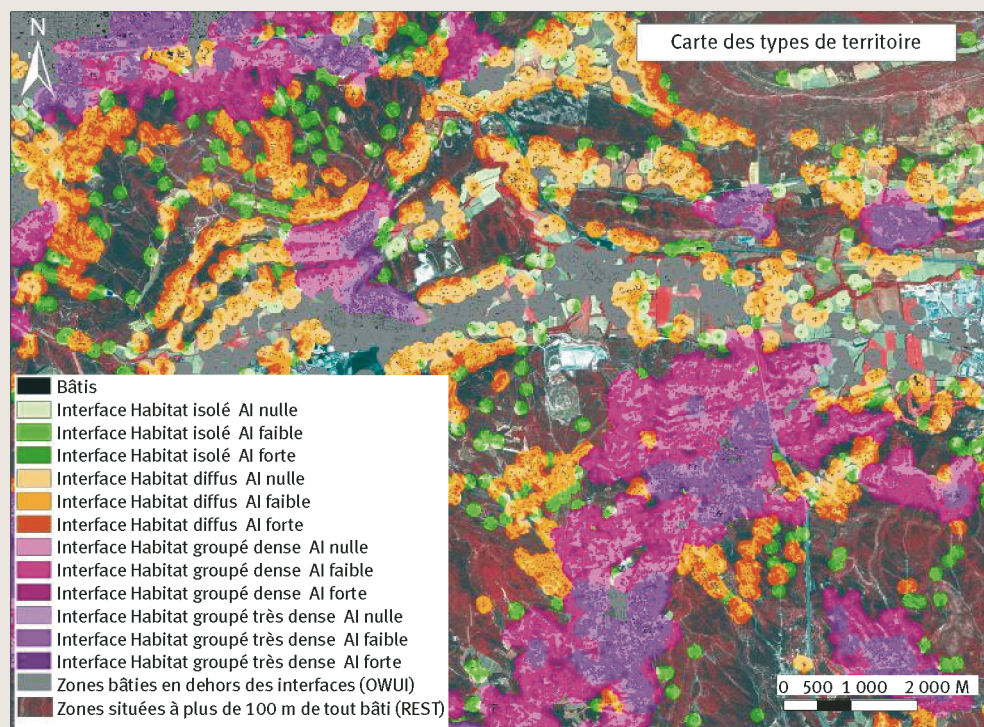
Comparaison d'échantillons pour identifier les caractéristiques d'environnement naturel et humain liées aux niveaux de risque

Les trois variables à expliquer – densité des points d'éclosion DE, densité d'incendie de forêt DI et taux de surfaces brûlées SB – ayant été calculées pour chaque polygone, des analyses ont été réalisées pour connaître l'environnement naturel et humain le plus propice aux valeurs élevées de chacune de ces trois variables. Ces analyses ont consisté à comparer :

- des échantillons constitués d'une part de polygones pour lesquels la variable à expliquer avait une valeur nulle et d'autre part de polygones pour lesquels la variable à expliquer avait une valeur non nulle ;
- des échantillons constitués d'une part de polygones pour lesquels la variable à expliquer avait une valeur faible et d'autre part de polygones pour lesquels la variable à expliquer avait une valeur forte.

Pour cette seconde comparaison et pour une meilleure interprétation des résultats, les polygones ayant des variables à expliquer à valeur nulle (donc sans départ de feu ni parcours d'incendie) et à valeur intermédiaires ont été supprimés. Pour chacune des variables à expliquer, chaque échantillon de polygones a été classé par valeurs croissantes des variables et divisé en trois parties égales avec valeurs faibles, intermédiaires et fortes. Les compa-

2 Cartographie des types de territoire



► raisons ont porté sur les échantillons à valeurs faibles et fortes. Pour chaque échantillon déterminé par les valeurs des variables à expliquer et chaque variable explicative, les moyenne, médiane, écart-type, coefficient de variation ont été calculés. Pour tester la significativité des différences observées, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été réalisé, la distribution des valeurs ne suivant généralement pas une loi normale.

PLS : Partial Least Squares

Pour réaliser une régression de chacune des trois variables à expliquer – densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées SB (ou indicateur de risque) – sur des variables explicatives $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$ qui sont fortement corrélées entre elles, la méthode de régression à plusieurs facteurs de type Moindres carrés partiels PLS (*Partial Least Squares*) a été retenue. Par ailleurs les coefficients de régression, pouvant être interprétables, devaient permettre de mesurer la contribution de chaque variable x_i à la construction de chacune des trois variables DE, DI et SB. La régression PLS a donc été mise en œuvre pour réaliser la régression de chacun des trois indicateurs sur l'ensemble des variables explicatives.

Le logiciel Statgraphics® Centurion a permis de réaliser les calculs, et certaines étapes ont été renforcées en utilisant des logiciels complémentaires comme le logiciel ADE4 et le logiciel R, pour s'assurer de la robustesse des résultats obtenus et de leur significativité.

Résultats

Environnement propice aux départs de feu, à la présence d'incendies et à leur extension

Les résultats de l'analyse statistique par comparaison d'échantillons ont été synthétisés dans les tableaux 1, 2 et 3 (cf. annexes pages 10 à 12). Ils ont permis de souligner quelques caractéristiques d'occupation du sol, d'environnement naturel et topographique, les plus propices aux départs de feu, à la présence d'incendies et à leur extension. Ainsi un espace plutôt naturel (forêts et garrigues), peu agricole mais avec une représentation urbaine plutôt forte (forte densité de bâtis de 178 bâtis/km² et de routes de 7 km/km²) est propice à une densité de départ de feu non nulle. Et ce d'autant plus qu'il s'agira de zones d'expositions chaudes et très chaudes. En revanche la nature de la végétation ne joue pas de rôle prédéterminant.

Cette densité de départ de feu augmente avec une plus forte représentation de l'espace naturel marqué par une densité de chemins élevée (7,3 km/km²) et une moindre représentation de l'espace urbain (densité de bâtis de 59 bâtis/km² et de routes de 6 km/km²). Ces caractéristiques s'apparentent davantage aux zones d'interfaces habitat-forêt qu'ailleurs. Un espace naturel très présent (forêts et garrigues) est propice à une densité d'incendie de forêt non nulle. Cette présence se traduit par ailleurs par une végétation très présente, continue ou éparse, constituée de peuplements mixtes et surtout de garrigues. La densité de chemins y est également plus forte avec 7,2 km/km² et les expositions plutôt chaudes et très chaudes sont davantage présentes. Cette densité d'incendie augmente avec

une moindre représentation de l'espace urbain (densité de bâtis de 42 bâtis/km² et de routes de 3 km/km²). Là encore, ces caractéristiques s'apparentent davantage aux zones d'interfaces habitat-forêt qu'ailleurs. Enfin l'environnement pour lequel le taux de surfaces brûlées est non nul est similaire à celui d'une densité d'incendie non nulle.

Modélisation des indicateurs de risque (variables à expliquer) avec la PLS

Par des régressions de type Moindres carrés partiels PLS, chacun des trois indicateurs – densité de départ de feu, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées – a été modélisé sous la forme d'une combinaison linéaire de variables relatives à l'environnement naturel, physique et socio-économique. Ces variables se sont avérées comme les plus significatives avec des poids relatifs, contribuant de façon positive ou négative à l'explication de chacun des trois indicateurs sur le territoire étudié.

Ainsi sept variables ont contribué de façon significative à l'explication de l'indicateur de Densité de départ de feu ou d'éclosion DE. Ces variables sont :

- le type de territoire appelé interface habitat-forêt en habitat isolé I et la part occupée par les autres espaces naturels ESN qui contribuent positivement ;
- le type de territoire non bâti R, la densité de bâtis DB, la part occupée par l'espace urbain URB, l'interface habitat-forêt en habitat groupé dense GD et l'interface habitat-forêt en habitat groupé très dense GTD qui contribuent négativement.

Neuf variables ont contribué de façon significative à l'explication de l'indicateur de Densité d'incendie DI. Ces variables sont :

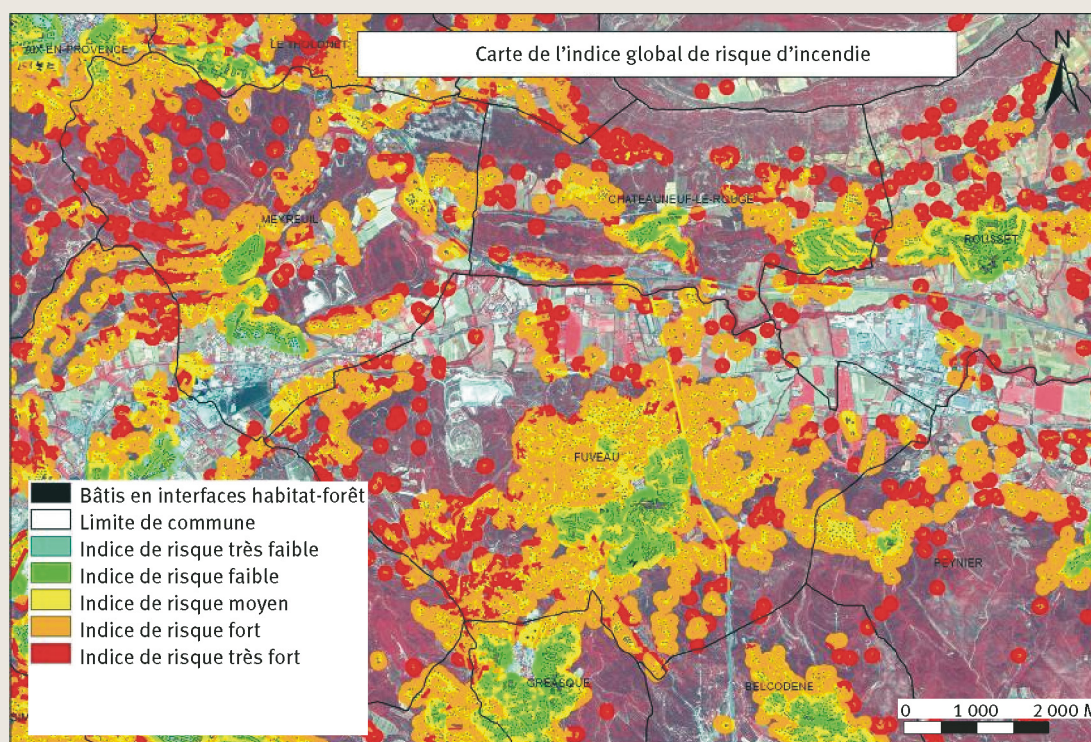
- le type de territoire appelé interface habitat-forêt en habitat isolé I et la part occupée par les autres espaces naturels ESN et les zones d'exposition très chaudes KR5 qui contribuent positivement ;
- le type de territoire non bâti R, la densité de bâtis DB, l'interface habitat-forêt en habitat groupé très dense GTD, la part occupée par l'espace urbain URB, la présence de végétation résineuse VG2 et l'interface habitat-forêt en habitat groupé dense GTD qui contribuent négativement.

Et enfin, onze variables ont contribué de façon significative à l'explication de l'indicateur taux de surfaces brûlées SB. Ces variables sont :

- la part occupée par les autres espaces naturels ESN, et la végétation de garrigue VG4, le type de territoire, interface habitat-forêt en habitat isolé I, la densité de chemins DC, l'agrégation faible de la végétation AI2 et l'altitude ALT qui contribuent positivement ;
- la part occupée par l'espace agricole AGR, l'interface habitat-forêt en habitat groupé dense GD, la densité des routes DR, la densité de bâtis DB et la part occupée par l'espace urbain URB qui contribuent négativement.

La modélisation de chacun des trois indicateurs de risque a été obtenue avec des valeurs du coefficient de détermination R² qui permettent de mesurer la fiabilité des modèles. Ainsi les modélisations relatives à DE et DI présentent des valeurs de R² respectives de 51 % et 57 %. Les facteurs pris en compte peuvent expliquer de façon satisfaisante les densités d'éclosion et d'incendies. La modélisation SB présente une valeur plus faible de R² de

❶ Carte de l'indice global de risque d'incendie.



Fonds Spot 5 2,5 m – © CNES 2002 – Distribution Spot Image – BD Carto © IGN.

36 %. Le modèle est moins bon bien qu'il soit significatif. Syphard *et al.* (2007) ont trouvé également de meilleurs résultats sur la fréquence des incendies plutôt que sur les surfaces brûlées avec des coefficients de R^2 du même ordre de grandeur pour les surfaces brûlées.

Construction d'un indice global du risque d'incendie et sa cartographie

Indice global du risque d'incendie

Les trois indicateurs de risque définis DE, DI et SB permettent d'appréhender la notion de risque d'incendie. Chacun de ces indicateurs est en effet porteur de tout ou partie d'informations relatives à l'aléa et à la vulnérabilité. Ainsi, DE et DI contribuent à apprécier l'occurrence du phénomène incendie de forêt (Probabilité d'éclosion, Probabilité d'incendie) et SB permet quant à lui de mesurer le niveau d'intensité de l'incendie (à considérer en termes d'aléa et de vulnérabilité) et le taux de dommages notamment l'impact sur les espaces naturels. À partir de la combinaison de ces trois indicateurs élémentaires de risque – Densité d'éclosion DE, Densité d'incendie DI, Taux de surfaces brûlées SB – un indice de risque IR, unique, global et synthétique a été produit. Sa formule est une combinaison linéaire des indicateurs DE, DI et SB, chaque indicateur ayant le même poids au regard du risque. Cependant chacun des trois modèles a été obtenu avec un coefficient de détermination variable. Ainsi la densité d'éclosion DE, respectivement la densité d'incendie DI et le taux de surfaces brûlées SB, sont expliqués à 51 %, 57 % et 36 % par la combinaison de sept, neuf et onze variables les plus significatives. Il a donc été

décidé de pondérer la contribution de chaque indicateur DE, DI et SB dans la combinaison linéaire de l'indice de risque proposé par la performance du pouvoir explicatif de chaque indicateur. En considérant que le meilleur modèle obtenu pour les indicateurs de risque est celui de la densité d'incendie DI. DI a été pris en référence et on lui a affecté la valeur 1. À l'indicateur Densité d'éclosion DE dont le pouvoir explicatif est de 51 %, une valeur de 0,89 correspondant au ratio de 51/57 a été affectée, 57 étant la valeur du pouvoir explicatif de l'indicateur Densité d'incendie DI. De la même façon, une valeur 0,63 a été affectée à l'indicateur Taux de surfaces brûlées SB. Ainsi, l'indice global de risque d'incendie IR est défini par la formule suivante :

$$IR = 0,89 DE + DI + 0,63 SB$$

Cet indice, calculé sous système d'information géographique, a été traduit par une carte de risque dans les interfaces (figure ❶) sachant que chaque indicateur a été également cartographié de façon indépendante (Lampin-Maillet, 2009).

Analyse du risque d'incendie

L'analyse du risque d'incendie a été développée à partir des résultats cartographiques obtenus sur la zone d'étude. Ces résultats ont montré que plus de 42 % des interfaces habitat-forêt sont situées en zone de fort et très fort risque. Cette surface importante n'inclut cependant que 5 % des bâtis situés dans les interfaces habitat-forêt. Les efforts qui seraient concentrés sur ces zones en termes de moyens de prévention et de mise en préparation à recevoir un feu auraient plus d'impacts positifs sur

② Les zones où l'habitat est en contact étroit avec la forêt représentent une véritable préoccupation pour la gestion du risque incendie.



© J. Laurent (Iristeo-Cemagref)

la réduction des dommages que s'ils étaient distillés sur la totalité des zones en interfaces habitat-forêt au regard du risque d'incendie. Presque 100 % (99,6 %) des zones situées dans les interfaces en habitat isolé et plus des deux tiers (71 %) de celles en habitat diffus sont en zone à risque fort et très fort. Elles sont caractérisées par une faible densité de bâti avec en moyenne 41 bâtis/km² pour l'habitat isolé et 94 bâtis/km² pour l'habitat diffus (Lampin-Maillet, 2009). Ces seules interfaces en habitat isolé et en habitat diffus concernent plus des trois-quarts des bâtis (77 %) situés dans les zones à risque fort et très fort. Le risque faible n'est pratiquement pas présent dans ces interfaces habitat-forêt et la valeur modérée de l'indice global de risque n'apparaît que pour les interfaces habitat-forêt en habitat diffus pour 20 % à 30 % des surfaces. Près d'un quart des bâtis (23 %) situés dans des zones à risque fort et très fort sont dans des interfaces en habitat groupé (dense 20 % et très dense 3 %). On peut aussi souligner qu'il n'y a pas de risque très fort dans les interfaces habitat-forêt de type groupé très dense. Ces interfaces sont caractérisées par des densités élevées de bâtis, (en moyenne 130 bâtis/km² pour le groupé dense et 394 bâtis/km² pour le groupé très dense). En cas d'incendie, ce sont des zones qui nécessiteront éventuellement des plans d'évacuation. Or la mise en œuvre de tels plans est fonction du temps nécessaire à l'évacuation d'un quartier. Deux facteurs entrent dans la détermination de ce temps : le nombre de personnes à évacuer et la capacité du réseau routier à faire circuler un nombre important de voitures à la minute.

Aussi la connaissance des zones à risque fort et très fort, combinée à la connaissance de la densité du bâti et de l'importance du réseau routier pourra aider à identifier les quartiers qui ont potentiellement le double handicap d'une forte densité de population et d'un réseau routier pas toujours adapté pour évacuer les populations et peut-être ainsi à préparer efficacement, par exemple, un plan communal de sauvegarde dans le cadre du risque d'incendie.

Au sein des interfaces habitat-forêt de type isolé et diffus, la répartition des classes de valeurs de l'indice de risque varie peu avec l'augmentation de l'indice d'agrégation de la végétation. En revanche, au sein des interfaces habitat-forêt de type groupé dense, les parts représentées par un indice de risque faible et modéré diminuent avec une augmentation de l'indice d'agrégation de la végétation passant de 90 % avec un indice d'agrégation de valeur nulle à 50 % avec un indice d'agrégation de valeur forte. Et au sein des interfaces habitat-forêt de type groupé très dense, les parts représentées par un indice de risque très faible et faible diminuent avec une augmentation de l'indice d'agrégation de la végétation passant de 85 % avec un indice d'agrégation de valeur nulle à 50 % avec un indice d'agrégation de valeur forte.

Discussion

Le fait que les variables qui ont le mieux prédit la densité d'éclosion diffèrent de celles qui ont le mieux prédit la densité d'incendie ou le taux de surfaces brûlées explique pourquoi les patrons spatiaux dans les cartes prédictives associées sont différents les uns des autres. Dans une perspective de gestion, la superposition des trois cartes prédictives relatives à la densité d'éclosion, la densité d'incendie et le taux de surfaces brûlées, est utile conduisant à la carte de l'indice global de risque (figure ③). Elle peut permettre d'identifier des zones qui sont non seulement soumises à un haut risque d'éclosion, mais également d'identifier des zones pour lesquelles ces ignitions pourront générer un feu et impacter des surfaces plus ou moins importantes (Syphard, 2007). Puis les zones ayant un haut niveau de risque pourront être ciblées pour des actions de prévention comme la réduction du combustible, les zones moins sensibles pourront être traitées, si besoin, dans un second temps. Ce modèle proposé permet une évaluation du risque par une approche purement descriptive. Il suffit en effet d'effectuer une lecture simple et directe du territoire à partir de la typologie d'interfaces habitat-forêt proposée, complétée par des descripteurs d'occupation du sol pour obtenir, grâce au modèle, le niveau de risque associé. Il n'est pas nécessaire de maîtriser les techniques spécialisées de connaissance des aléas, ou de diagnostic des vulnérabilités exigés dans la plupart des méthodes traditionnelles d'évaluation du risque, qui sont réservés, quant à elles aux seuls experts. Mais ce modèle global de risque est construit et fondé sur des résultats issus d'analyses spatiales et statistiques réalisées sur une zone d'étude donnée, la zone située entre les métropoles d'Aix-en-Provence et Marseille en l'occurrence.

Pour prédire les trois indicateurs de risque élaborés, densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées SB sur un autre territoire, les gestionnaires doivent être conscients que l'influence relative des variables humaines et biophysiques est probablement variable selon les régions, selon l'échelle spatiale ou temporelle d'analyse et selon le type d'activité humaine (Syphard, 2007). Si la méthode de construction du modèle peut être généralisée et appliquée sur un autre territoire disposant de données suffisantes (sur les départs de feu et distributions spatiales des incendies

notamment), le modèle lui-même restera valide a priori pour la seule zone étudiée. Le choix des variables prédictives nécessaires à la construction d'un modèle applicable sur un autre territoire et leurs poids respectifs devra être validé par une analyse statistique préalable de type PLS. L'indice global de risque IR ainsi que les indicateurs de risque DE, DI et SB associés ont été modélisés, pour la composante risque d'incendie, à partir de l'analyse de données historiques portant sur la distribution spatiale des points d'éclosion sur la période 1997-2007 sur la zone d'étude et la distribution spatiale des incendies sur la période 1990-2007. Leur représentation spatiale en cinq niveaux devra être validée en la confrontant avec la distribution spatiale de nouveaux points d'éclosion et de nouveaux contours d'incendie des saisons d'incendie à venir.

Conclusion

Dans l'article, les interfaces habitat-forêt, définies de façon précise dans le contexte du risque d'incendie (Lampin-Maillet *et al.*, 2010a,b) ont été cartographiées. Cette carte des interfaces habitat-forêt a alors contribué à produire une nouvelle carte du territoire, compartimenté en espaces dits « interfacés » (types d'interfaces habitat-forêt), et en espaces dits « non interfacés » (espaces bâtis hors interfaces et le reste du territoire).

La mise en relation entre la carte des types de territoire ainsi identifiés et les répartitions spatiales de départs de feu, d'incendies et de surfaces brûlées a permis de souligner les environnements propices au risque d'incendie. À partir d'une analyse spatiale et statistique du territoire, des indicateurs de risque ont été définis pour construire un modèle de risque global dans ces interfaces habitat-forêt situées en région méditerranéenne française, modèle aujourd'hui à l'état de prototype.

Cette méthode d'évaluation du risque d'incendie, innovante, croise les types de territoire et les caractéristiques environnementales, topographiques et socio-économiques avec l'historique des feux à travers la distribution spatiale des départs de feu, celle des surfaces brûlées et la fréquence de passage des incendies. L'importance de certaines variables peut être mise en évidence à travers

leur contribution positive ou négative à l'explication de trois indicateurs de risque définis comme densité d'éclosion, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées.

La modélisation de ces indicateurs a contribué à la construction d'un indice global de risque et à sa cartographie qui permet de déduire facilement, et de manière assez directe, l'information synthétique sur les niveaux de risque à l'échelle du territoire.

Ainsi l'approche par les « interfaces habitat-forêt », intrinsèquement porteuses de l'information synthétique aléa/enjeux/vulnérabilité, a servi de clé d'entrée pour une évaluation directe et globale du risque, fondée sur l'observation et la description des territoires d'une part, et en particulier des interfaces habitat-forêt, et sur une analyse spatiale et statistique de ces territoires. Elle permet également de tirer des enseignements d'une meilleure connaissance du territoire et du risque d'incendie associé en termes de prévention. ■

Les auteurs

Corinne LAMPIN et Marielle JAPPIOT

Cemagref, Centre d'Aix-en-Provence,
UR EMAX, Écosystèmes méditerranéens et risques
3275 route de Cézanne, CS40061,
13182 Aix-en-Provence Cedex 5
corinne.lampin@irstea.fr
marielle.jappiot@irstea.fr

Jean-Paul FERRIER

Université d'Aix-Marseille I, UMR Espace,
98 bd Édouard Herriot, BP 3209, 06204 Nice Cedex

Remerciements

Les auteurs remercient le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, le ministère de l'Agriculture, le conseil régional Provence-Alpes-Côte-d'Azur pour le financement de programmes de recherche ainsi que la Commission européenne pour le financement du projet Européen Fireparadox n° FP6-018505.

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- LAMPIN-MAILLET, C., BOUILLON, C., 2011, WUImap: a software tool for mapping wildland-urban interfaces in Mediterranean European context, *Environmental Modelling & Software*, n° 5, p. 1-4.
- LAMPIN-MAILLET, C., JAPPIOT, M., LONG, M., BOUILLON, C., MORGE, D., FERRIER, J.-P., 2010a, Mapping wildland-urban interfaces at large scales integrating housing density and vegetation aggregation for fire prevention in the South of France, *Journal of Environmental Management*, n° 91, p. 732-741.
- LAMPIN-MAILLET, C., BOUILLON, C., LONG, M., MORGE, D., JAPPIOT, M., 2010b, *Guide de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat forêt dans le contexte des incendies de forêt et son Outil de cartographie WUImap®*, Convention n° 2008 11 9 071 U du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, 68 p.
- LAMPIN-MAILLET, C., *Caractérisation de la relation entre organisation spatiale d'un territoire et risque d'incendie : Le cas des interfaces habitat-forêt du sud de la France*, thèse de doctorat en géographie – analyse spatiale, Université de Provence, Aix-Marseille I, 325 p.
- STURTEVANT, B.R., CLELAND, D.T., 2007, Human and biophysical factors influencing modern fire disturbance in northern Wisconsin, *International Journal of Wildland Fire*, n° 16, p. 398-413.
- SYPHARD, A.D., CLARKE, K.C., FRANKLIN, J., 2007, Simulating fire frequency and urban growth in southern California coastal shrublands, USA, *Landscape Ecology*, n° 22, p. 431-445.
- THEOBALD, D.M., ROMME, W.H., 2007, Expansion of the US wildland-urban interface, *Landscape and Urban Planning*, n° 83, p. 340-354.

Annexes

❶ Résultats des comparaisons d'échantillons (i) densité d'éclosion DE nulle/densité d'éclosion non nulle ; (ii) densité d'éclosion faible/densité d'éclosion forte.

Variables	Polygones avec DE nulle (*)	Polygones avec DE non nulle (*)	Test de Kruskal-Wallis	Probabilité	Variables	Polygones avec DE nulle (*)	Polygones avec DE non nulle (*)	Test de Kruskal-Wallis	Probabilités
	Taille échantillon : 2769	Taille échantillon : 192				Taille échantillon : 64	Taille échantillon : 64		
AGR (%)	27 – 33 (31) 94 %	13 – 18 (19) 105 %	28,5828	8,97757E-8	AGR (%)	16 – 19 (16) 84 %	6 – 18 (22) 122 %	4,73	0,0296
BOI (%)	18 – 26 (27) 104 %	27 – 32 (23) 72 %	21,1135	0,000004	BOI (%)	25 – 26 (16) 62 %	33 – 35 (27) 77 %	2,81424	0,093
ESN (%)	2 – 15 (23) 153 %	9 – 18 (22) 122 %	42,6066	6,69346E-11	ESN (%)	5 – 9 (10) 111 %	21 – 28 (27) 96 %	12,5755	0,0003
URB (%)	14 – 24 (25) 104 %	24 – 30 (23) 77 %	20,3108	0,000006	URB (%)	53 – 44 (23) 52 %	10 – 15 (16) 107 %	46,0597	1,14E-1
CRE (%)	0 – 1,6 (8) 500 %	0 – 2 (10) 500 %	57,3676	0,0	CRE (%)	1 – 1 (2) 200 %	0 – 3 (14) 467 %	40,9213	1,58E-10
DB (h/km²)	54 – 91 (112) 123 %	100 – 178 (185) 104 %	64,0052	0,0	DB (h/km²)	249 – 299 (215) 72 %	53 – 59 (31) 53 %	54,7828	0,0
DC (km/km²)	6 – 7 (4) 57 %	6 – 6 (3) 50 %	0,0168309	0,896	DC (km/km²)	5,5 – 5,8 (2) 34 %	7 – 7,3 (4,6) 63 %	4,99598	0,025
DR (km/km²)	4 – 5 (6) 120 %	6 – 7 (5) 71 %	42,3984	7,44509E-11	DR (km/km²)	9,7 – 9,3 (4,8) 52 %	4,8 – 6 (6) 100 %	15,3325	0,00009
EX1 (%)	10 – 23 (28) 122 %	15 – 24 (25) 104 %	5,01257	0,025	EX1 (%)	24 – 26 (20) 77 %	10 – 23 (30) 130 %	6,33326	0,011
EX2 (%)	52 – 52 (28) 54 %	52 – 50 (21) 42 %	1,24948	0,263	EX2 (%)	52 – 49 (12) 24 %	53 – 50 (28) 56 %	0,308251	0,578
EX3 (%)	14 – 25 (29) 116 %	23 – 27 (24) 89 %	7,63091	0,005	EX3 (%)	22 – 25 (19) 76 %	19 – 27 (29) 107 %	0,993845	0,318
PT (%)	5 – 7 (3) 43 %	6,3 – 8 (3) 37 %	52,6359	0,0	PT (%)	6,6 – 7,1 (2,1) 29 %	6,3 – 8,3 (4) 48 %	0,539293	0,462
ALT (m)	181 – 181 (112) 62 %	187 – 182 (101) 55 %	0,0992271	0,752	ALT (m)	185 – 172 (91) 53 %	187 – 196 (111) 57 %	1,04986	0,305
KR1 (%)	0 – 1,4 (6) 428 %	0 – 2 (4) 200 %	126,802	0,0	KR1 (%)	0,4 – 1,8 (3) 167 %	0 – 1,6 (4) 250 %	15,9913	0,00006
KR2 (%)	0 – 12 (20) 167 %	10 – 17 (19) 111 %	42,0002	9,12647E-11	KR2 (%)	11 – 14 (11) 78 %	4 – 18 (26) 144 %	2,90382	0,088
KR3 (%)	65 – 62 (33) 53 %	48 – 50 (26) 52 %	28,8077	7,99347E-8	KR3 (%)	51 – 54 (20) 37 %	36 – 41 (31) 76 %	7,26395	0,007
KR4 (%)	8 – 20 (25) 125 %	20 – 24 (21) 87 %	23,4335	0,000001	KR4 (%)	22 – 25 (17) 68 %	18 – 26 (27) 104 %	0,952231	0,319
KR5 (%)	0 – 5 (13) 260 %	1 – 8 (15) 187 %	68,4247	0,0	KR5 (%)	4 – 6 (6) 100 %	0 – 11 (20) 181 %	8,81	0,002
VG0 (%)	78 – 71 (26) 37 %	66 – 63 (21) 33 %	32,0171	1,52822E-8	VG0 (%)	70 – 69 (16) 23 %	57 – 59 (24) 41 %	6,6716	0,009
VG1 (%)	0,04 – 1,4 (4) 285 %	0,1 – 1,1 (3) 273 %	11,0325	0,000894806	VG1 (%)	0,4 – 0,8 (1) 125 %	0 – 1,8 (4) 222 %	13,3011	0,0002
VG2 (%)	0,8 – 5 (9) 180 %	4 – 8 (10) 125 %	77,2765	0,0	VG2 (%)	5 – 5 (4) 80 %	4 – 7 (10) 143 %	0,785746	0,375
VG3 (%)	4 – 12 (17) 142 %	9 – 14 (14) 100 %	27,9113	1,27005E-7	VG3 (%)	10 – 12 (10) 83 %	10 – 17 (18) 106 %	0,188068	0,664
VG4 (%)	9 – 12 (11) 92 %	13 – 15 (8) 53 %	41,8321	9,94596E-11	VG4 (%)	13 – 13 (6) 46 %	13 – 16 (10) 63 %	1,07931	0,298
AI1 (%)	47 – 48 (31) 65 %	31 – 34 (22) 65 %	38,3269	5,98324E-10	AI1 (%)	35 – 39 (17) 44 %	23 – 32 (25) 78 %	4,88953	0,027
AI2 (%)	34 – 33 (19) 58 %	44 – 43 (14) 33 %	48,248	3,75577E-12	AI2 (%)	44 – 42 (12) 108 %	43 – 43 (16) 37 %	0,0090843	0,924
AI3 (%)	11 – 18 (19) 105 %	20 – 23 (16) 70 %	39,1046	4,01693E-10	AI3 (%)	17 – 19 (11) 58 %	22 – 25 (18) 73 %	3,33142	0,067

Légende pour les colonnes avec (*), : Médiane – Moyenne (écart-type) coefficient de variation %

NB : Les valeurs des cases sans couleur sont significativement différentes ; les valeurs sur fond orange ne sont pas significativement différentes.

Annexes

② Résultats des comparaisons d'échantillons (i) densité d'incendie DI nulle/densité d'incendie non nulle ; (ii) densité d'incendie faible/densité d'incendie forte.

Variables	Polygones avec DE nulle (*)	Polygones avec DE non nulle (*)	Test de Kruskal-Wallis	Probabilité	Variables	Polygones avec DE nulle (*)	Polygones avec DE non nulle (*)	Test de Kruskal-Wallis	Probabilités
	Taille échantillon : 2 588	Taille échantillon : 373				Taille échantillon : 124	Taille échantillon : 124		
AGR (%)	27 – 34 (31) 91 %	13 – 22 (25) 114 %	49,6091	1,87E-12	AGR (%)	14 – 21 (22) 105 %	2 – 18 (25) 139 %	11,2471	0,0007
BOI (%)	18 – 27 (27) 100 %	22 – 27 (25) 93 %	1,33255	0,248	BOI (%)	22 – 27 (20) 74 %	20 – 28 (30) 107 %	1,37403	0,241
ESN (%)	1,5 – 13 (22) 169 %	21 – 29 (21) 72 %	211,579	0,0	ESN (%)	12 – 17 (18) 106 %	36 – 42 (33) 78 %	34,4261	4,427E-9
URB (%)	14 – 25 (26) 104 %	12 – 20 (22) 110 %	6,66675	0,009	URB (%)	28 – 34 (23) 68 %	5 – 11 (16) 145 %	88,4019	0,0
CRE (%)	0 – 1,7 (8) 470 %	0 – 1,1 (6) 545 %	0,110909	0,739	CRE (%)	0 – 1 (2) 200 %	0 – 1 (7) 700 %	44,6905	2,307E-11
DB (h/km ²)	56 – 95 (119) 125 %	57 – 108 (134) 124 %	1,74641	0,186	DB (h/km ²)	133 – 212 (186) 88 %	29 – 42 (28) 67 %	117,202	0,0
DC (km/km ²)	6 – 6,6 (4) 61 %	6,7 – 7,2 (4) 56 %	8,03502	0,004	DC (km/km ²)	5,8 – 6 (3) 50 %	7,3 – 8 (5) 62 %	10,9376	0,0009
DR (km/km ²)	4,2 – 5,5 (6) 109 %	3,3 – 4,7 (5) 106 %	7,01517	0,008	DR (km/km ²)	6,7 – 8 (5) 62 %	0 – 3 (5) 167 %	58,4752	0,0
EX1 (%)	9 – 23 (28) 122 %	21 – 28 (27) 96 %	20,5956	0,000005	EX1 (%)	28 – 29 (23) 79 %	14 – 25 (29) 116 %	5,77785	0,0162
EX2 (%)	52 – 52 (28) 54 %	53 – 53 (26) 49 %	0,55946	0,454	EX2 (%)	51 – 51 (20) 39 %	60 – 59 (30) 51 %	5,32371	0,0210
EX3 (%)	17 – 26 (29) 111 %	10 – 19 (24) 126 %	11,3349	0,0007	EX3 (%)	13 – 20 (20) 100 %	0 – 16 (25) 156 %	13,6738	0,0002
PTm (%)	5 – 6,6 (3) 45 %	6 – 8 (4) 50 %	75,9149	0,0	PT (%)	7 – 8 (3) 37 %	6 – 8 (4) 50 %	3,1683	0,075
ALT (m)	18 – 183 (114) 62 %	153 – 168 (94) 56 %	6,35584	0,011	ALT (m)	156 – 158 (84) 53 %	159 – 188 (103) 55 %	3,80298	0,051
KR1 (%)	0 – 1,4 (6) 428 %	0 – 1,7 (6) 353 %	12,3115	0,0004	KR1 (%)	0 – 2 (5) 250 %	0 – 1 (7) 700 %	33,8764	5,872E-9
KR2 (%)	0 – 12 (20) 167 %	3 – 11 (16) 145 %	0,375909	0,5398	KR2 (%)	7 – 11 (13) 118 %	0 – 12 (19) 158 %	5,16748	0,0230
KR3 (%)	67 – 63 (33) 52 %	43 – 47 (31) 66 %	80,4616	0,0	KR3 (%)	39 – 43 (25) 58 %	36 – 43 (34) 79 %	0,205505	0,650
KR4 (%)	6 – 18 (24) 133 %	26 – 30 (26) 87 %	100,2	0,0	KR4 (%)	30 – 34 (23) 68 %	21 – 31 (29) 93 %	3,47577	0,062
KR5 (%)	0 – 5 (13) 260 %	0 – 10 (17) 170 %	79,5508	0,0	KR5 (%)	5 – 10 (14) 140 %	0 – 13 (21) 161 %	4,82345	0,028
VG0 (%)	78 – 71 (26) 37 %	66 – 65 (23) 35 %	31,7765	1,729E-8	VG0 (%)	69 – 69 (19) 28 %	64 – 62 (26) 42 %	3,25452	0,071
VG1 (%)	0,07 – 1,5 (4) 267 %	0 – 0,5 (2) 400 %	60,6622	0,0	VG1 (%)	0 – 0,4 (1) 250 %	0 – 1 (2) 200 %	47,3211	6,025E-12
VG2 (%)	0,7 – 4,5 (9) 200 %	2,7 – 7 (11) 157 %	51,7786	0,0	VG2 (%)	4 – 8 (10) 125 %	1 – 6 (10) 167 %	13,1145	0,0002
VG3 (%)	4,7 – 12 (17) 142 %	4,4 – 9 (12) 133 %	0,493289	0,482	VG3 (%)	6 – 9 (9) 100 %	3 – 10 (17) 170 %	4,13088	0,042
VG4 (%)	8 – 11 (10) 91 %	15 – 18 (13) 72 %	144,353	0,0	VG4 (%)	13 – 14 (9) 64 %	18 – 22 (16) 73 %	12,4996	0,0004
AI1 (%)	48 – 49 (31) 63 %	36 – 38 (26) 68 %	43,1784	4,996E-11	AI1 (%)	37 – 40 (23) 57 %	29 – 34 (29) 85 %	5,98626	0,0144
AI2 (%)	34 – 33 (19) 58 %	43 – 42 (18) 43 %	68,7045	0,0	AI2 (%)	43 – 41 (15) 36 %	45 – 44 (20) 45 %	1,75365	0,185
AI3 (%)	11 – 18 (19) 105 %	16 – 21 (16) 76 %	25,1706	5,247E-7	AI3 (%)	17 – 19 (13) 68 %	14 – 22 (19) 86 %	0,00263593	0,959

Légende pour les colonnes avec (*): **Médiane** – Moyenne (*écart-type*) coefficient de variation %

NB : Les valeurs des cases sans couleur sont significativement différentes ; les valeurs sur fond orange ne sont pas significativement différentes.

Annexes

❸ Résultats des comparaisons d'échantillons (i) taux de surface brûlée SB nul/taux de surface brûlée SB non nul ; (ii) taux de surface brûlée faible/taux de surface brûlée fort.

Variables	Polygones avec DE nulle (*)	Polygones avec DE non nulle (*)	Test de Kruskal-Wallis	Probabilité	Variables	Polygones avec DE nulle (*)	Polygones avec DE non nulle (*)	Test de Kruskal-Wallis	Probabilités
	Taille échantillon : 1957	Taille échantillon : 1 004				Taille échantillon : 335	Taille échantillon : 335		
AGR (%)	36 – 39 (32) 82%	14 – 21 (23) 109%	210,107	0,0	AGR (%)	20 – 27 (25) 92%	2 – 14 (19) 135%	66,8746	0,0
BOI (%)	14 – 24 (27) 112%	27 – 32 (27) 84%	65,2788	0,0	BOI (%)	29 – 32 (24) 75%	22 – 30 (28) 93%	3,51177	0,0609
ESN (%)	0 – 8 (17) 212%	19 – 28 (28) 100%	662,639	0,0	ESN (%)	7 – 13 (16) 123%	41 – 45 (31) 69%	193,243	0,0
URB (%)	16 – 27 (27) 100%	11 – 18 (20) 111%	68,053	0,0	URB (%)	19 – 27 (23) 85%	6 – 10 (14) 140%	127,437	0,0
CRE (%)	0 – 1,8 (9) 500%	0 – 1,3 (7) 538%	0,642814	0,422	CRE (%)	0 – 1,7 (7) 412%	0 – 1,1 (8) 727%	49,4125	2,074E-12
DB (h/km²)	56 – 98 (123) 125%	57 – 95 (115) 121%	1,38164	0,239	DB (h/km²)	82 – 141 (145) 103%	40 – 53 (52) 98%	149,826	0,0
DC (km/km²)	5,7 – 6,1 (4,2) 69%	7,3 – 7,8 (4,5) 58%	96,2323	0,0	DC (km/km²)	6,1 – 6,4 (3,5) 55%	8,7 – 9 (5) 55%	54,8355	0,0
DR (km/km²)	4,6 – 6 (6,3) 105%	3,1 – 4,3 (4,8) 112%	53,2006	0,0	DR (km/km²)	5,4 – 6,4 (5) 78%	0 – 2,4 (3,5) 146%	128,703	0,0
EX1 (%)	6 – 21 (28) 133%	20 – 27 (28) 104%	59,6341	0,0	EX1 (%)	19 – 26 (27) 104%	20 – 27 (28) 104%	0,000917	0,975
EX2 (%)	53 – 52 (29) 56%	51 – 52 (26) 50%	0,566681	0,451	EX2 (%)	51 – 51 (25) 49%	53 – 52 (27) 52%	0,361006	0,547
EX3 (%)	17 – 27 (30) 111%	13 – 21 (24) 114%	15,0574	0,0001	EX3 (%)	14 – 23 (25) 109%	14 – 21 (24) 114%	1,18457	0,276
PTm (%)	5 – 6,2 (2,5) 40%	6,4 – 7,9 (3,4) 43%	300,269	0,00	PT (%)	6 – 7 (3) 43%	7 – 9 (3) 33%	7,19531	0,007
ALT (m)	167 – 166 (107) 4%	201 – 209 (117) 56%	69,587	0	ALT (m)	185 – 188 (108) 57%	241 – 249 (132) 53%	38,3255	5,987E-10
KR1 (%)	0 – 1,1 (6) 545%	0 – 1,9 (6) 316%	63,5622	0,0	KR1 (%)	0 – 1,4 (5) 357%	0 – 2,3 (7) 304%	3,64671	0,056
KR2 (%)	0 – 11 (20) 181%	7 – 15 (20) 133%	77,9068	0,0	KR2 (%)	7 – 14 (17) 121%	7 – 16 (21) 131%	0,121589	0,727
KR3 (%)	79 – 69 (32) 46%	43 – 46 (30) 65%	336,805	0,0	KR3 (%)	48 – 50 (28) 56%	37 – 43 (31) 72%	12,201	0,0004
KR4 (%)	0 – 16 (24) 150%	24 – 28 (25) 89%	260,061	0,0	KR4 (%)	23 – 27 (24) 89%	22 – 27 (25) 92%	0,107512	0,742
KR5 (%)	0 – 3,4 (11) 323%	0 – 9,3 (17) 183%	231,18	0,0	KR5 (%)	0 – 8 (14) 175%	0 – 12 (20) 167%	0,08918	0,765
VG0 (%)	84 – 76 (25) 33%	60 – 59 (24) 41%	343,165	0,0	VG0 (%)	69 – 66 (22) 33%	53 – 53 (23) 43%	52,2644	0,0
VG1 (%)	0,07 – 1,4 (3,4) 243%	0,01 – 1,3 (4,4) 338%	18,8287	0,00001	VG1 (%)	0 – 1,3 (4) 307%	0 – 1,5 (6) 400%	29,7249	4,979E-8
VG2 (%)	0,6 – 4 (8,3) 207%	2 – 6,4 (10) 156%	105,417	0,00	VG2 (%)	3 – 7 (9) 128%	1 – 4 (9) 225%	32,5063	1,188E-8
VG3 (%)	3,4 – 11 (16) 145%	8 – 14 (17) 121%	117,674	0,00	VG3 (%)	8 – 13 (15) 115%	10 – 16 (18) 112%	4,37655	0,0364
VG4 (%)	6 – 8 (8) 100%	16 – 19 (12) 63%	618,264	0,00	VG4 (%)	12 – 13 (8) 61%	23 – 25 (15) 60%	144,59	0,0
AI1 (%)	57 – 55 (30) 54%	29 – 33 (25) 76%	356,831	0	AI1 (%)	36 – 40 (25) 62%	19 – 25 (23) 92%	69,4389	0,0
AI2 (%)	29 – 29 (19) 66%	44 – 43 (17) 39%	335,852	0	AI2 (%)	41 – 39 (16) 41%	49 – 48 (17) 35%	42,7064	6,360E-11
AI3 (%)	8 – 16 (18) 112%	22 – 24 (17) 71%	307,196	0	AI3 (%)	19 – 21 (15) 71%	23 – 27 (18) 66%	22,5399	0,000002

Légende pour les colonnes avec (*): **Médiane** – Moyenne (écart-type) coefficient de variation %

NB : Les valeurs des cases sans couleur sont significativement différentes ; les valeurs sur fond orange ne sont pas significativement différentes.