

MIEUX COMPRENDRE L'ÉVOLUTION ET LES IMPACTS DES INCENDIES EN MONTAGNE : LES ZONES BIOGÉOGRAPHIQUES ALPINES

Sylvain Dupire, ingénieur de recherche, INRAE Grenoble,
Thomas Curt, directeur de recherche, INRAE Aix-en-Provence,
Sylvain Bigot, professeur des universités, Université Grenoble Alpes

Les incendies et les feux agricoles ou pastoraux sont présents sur environ 60% du globe. Le feu, généré naturellement par la foudre (environ 10% des cas), ou allumé par l'homme (environ 90% des cas) est à la fois un aléa mais aussi une perturbation naturelle nécessaire dans certains écosystèmes.

Les modélisations et les travaux du GIEC nous montrent que le feu sera de plus en plus fréquent dans les prochaines décennies, du fait de l'augmentation des trois facteurs à l'origine des feux : le climat, les allumages, et la biomasse disponible. Si les montagnes européennes comme les Alpes sont relativement peu propices à de multiples incendies du fait d'un climat tempéré, les incendies d'été augmentent et sont parfois intenses et difficiles à arrêter du fait des difficultés d'accès et du nombre restreint de pompiers et de sapeurs-forestiers. Les activités humaines peuvent créer des départs de feux dans les zones pâturées ou agricoles. La montagne est surtout riche en différents écosystèmes forestiers qui accumulent de grandes quantités de végétation combustible, y compris des broussailles ou des sous-bois denses. Si ces conditions (climat, départs de feux, et quantité de combustible) sont réunies, des feux – parfois de grande ampleur – peuvent survenir et menacer les écosystèmes, les personnes, et les biens.

LES ZONES BIOGÉOGRAPHIQUES

Les environnements montagneux sont particulièrement sensibles aux variations climatiques (Knight, 2022). Le concept de pyrorégion (du grec pyro : le feu) a connu un développement récent à l'échelle du globe (Curt et al., 2014; Jiménez-Ruano et al., 2018; Galizia et al., 2021). Ce terme permet de distinguer des régions ayant chacune une activité de feux spécifique (densité des feux, taille des surfaces brûlées, intensité) et des caractéristiques environnementales qui leur sont propres comme la composition des types de forêts qui les génèrent, leur sensibilité au feu, etc. Il est particulièrement intéressant de l'appliquer aux montagnes, dont les microclimats varient rapidement. Les pyrorégions permettent ainsi de bien différencier les conditions climatiques, les types de végétation, et leur sensibilité au feu. Dans les Alpes françaises, Dupire et al. (2017) ont déterminé quatre zones biogéographiques (Figure 1) sur lesquelles le concept de pyrorégion pourrait s'appliquer (Dupire et al., 2017; Dupire et al., 2019).

En effet, il existe une forte variabilité spatiale et temporelle des feux, et des écosystèmes, à l'échelle des Alpes (Figure 1) : la pyrorégion des Alpes du Nord en altitude (> 800 m) est couverte de forêts à 46%, avec une dominance de futaies de conifères purs ou en mélange.

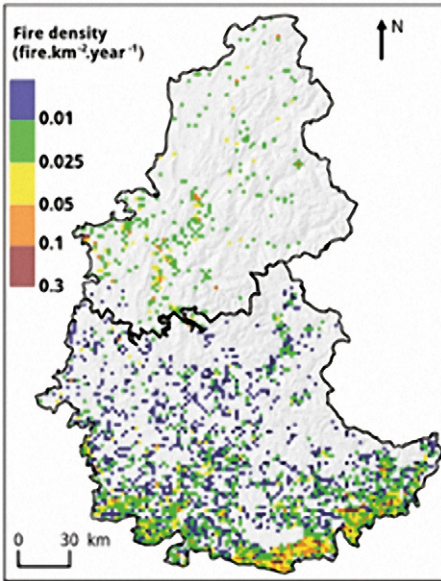
En moyenne, cette pyrorégion comprend 21 feux par an et 0.6 km² brûlés par an. La pyrorégion des Alpes du Nord à basse altitude (< 800 m) comprend 49% de forêts, et elle subit 5.3 feux par an en moyenne, et 0.2 km² brûlés par an. Elle est dominée par des taillis mélangés aux plus basses altitudes et des peuplements mélangés aux altitudes intermédiaires. Dans les Alpes du Sud, la pyrorégion d'altitude (> 800 m) est la plus vaste et celle qui contient le plus de forêts (71%), avec 44.9 feux par an et 4.1 km² brûlés par an. C'est le domaine des conifères purs, parfois mélangés. La pyrorégion des Alpes du Sud à basse altitude (< 800 m) est aussi largement boisée (66%). Elle est aussi nettement plus brûlée que les autres (114 feux par an, 8 km² brûlés chaque année). Elle est principalement recouverte de taillis et de peuplements mélangés, principalement composés de chênes et pins (Figure 2).

Le principal gradient climatique est nord-sud : les Alpes du Nord sont caractérisées par un climat montagnard avec des influences océaniques dégradées toute l'année. Les Alpes du sud sont marquées par un climat montagneux mais influencé par le climat méditerranéen, avec des étés secs, et des automnes et hivers humides.

Table 1: Total area, proportion of forested area and fire regime information of the four biogeographic zones used in the study. Annual values of number of fires and burned area refer to the period 2002-2015.

Biogeographic zone	Area [km ²]	Proportion of forest	Number of fires (> 100 ha) [fires.yr ⁻¹]	Burned area (% forest area) [km ² .yr ⁻¹]
1- Northern Alps ≤ 800 m	5850	46%	21.1 (0.13)	0.6 (0.02%)
2- Northern Alps > 800 m	10800	49%	5.3 (0)	0.2 (< 0.01%)
3- Southern Alps ≤ 800 m	8975	71%	113.7 (0.54)	8.0 (0.13%)
4- Southern Alps > 800 m	15035	66%	44.9 (0.25)	4.1 (0.04%)

(Figure 1) Les quatre zones biogéographiques - © Dupire et al.



(Figure 2) Superficie totale, proportion de la superficie forestière et informations sur le régime des incendies des quatre zones biogéographiques utilisées dans l'étude, la valeur annuelle, en kilomètre, du nombre d'incendies et la superficie brûlée se réfèrent à la période 2002-2015 - © INRAE, UGA.

VULNÉRABILITÉ ET SENSIBILITÉ DES ESPÈCES FORESTIÈRES AUX FEUX ALPINS

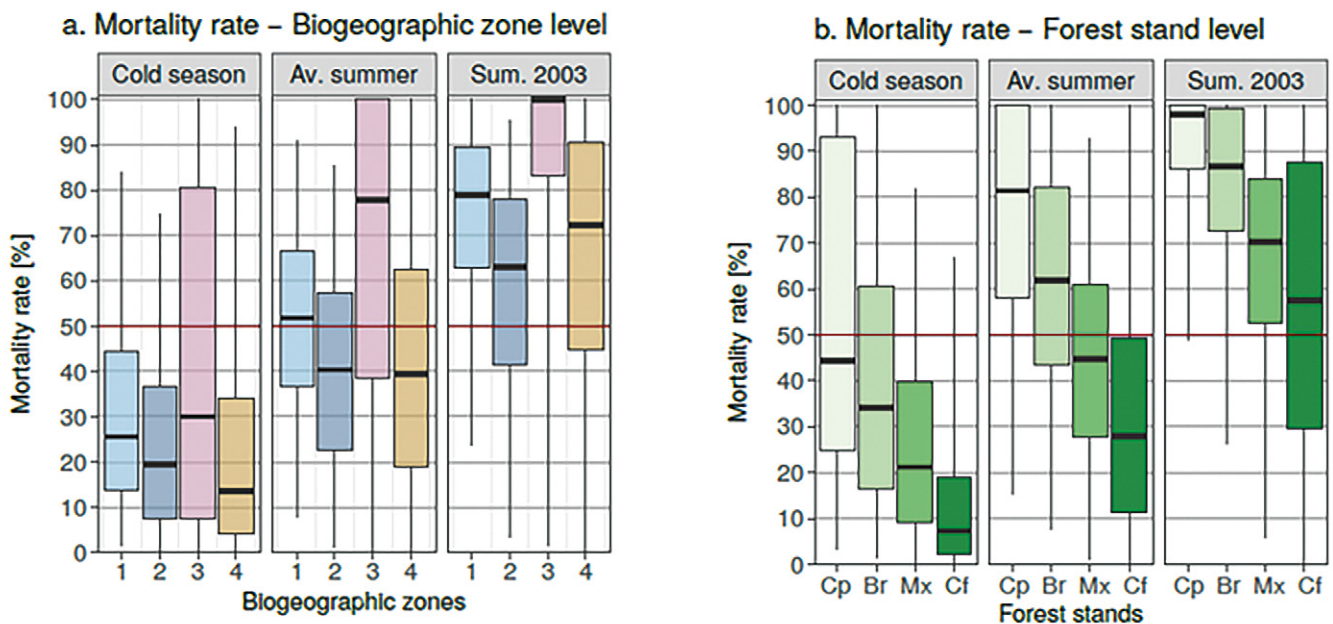
Dupire et al. (2017) ont étudié la vulnérabilité au feu des différentes pyrorrégions à l'échelle de la pyrorrégion, du peuplement, et de l'arbre (Figure 4). Ils ont utilisé 4438 placettes forestières issues de l'inventaire forestier national, et

112 placettes avec une description précise du combustible. Chacune des placettes (IFN ou combustible) a fait l'objet de simulations de feu à l'aide du logiciel FlamMap 5.0 (Finney, 2005), largement utilisé dans le monde. Les simulations de feu ont été réalisées sur une gamme de conditions météo, qui permet de comparer l'effet du climat et de la sécheresse de la végétation (conditions d'été moyennes, conditions d'été sévères, et conditions d'automne). FlamMap permet d'obtenir plusieurs grandeurs importantes : l'intensité du front de flamme, la vitesse de propagation, la vitesse du vent à mi-hauteur de flamme, et l'état hydrique de la végétation. Toutes ces variables permettent de caractériser le comportement d'un feu se propageant dans une forêt donnée. La mortalité d'un arbre ou d'une espèce donnée est liée à l'effet du feu sur la couronne de l'arbre et sur son cambium (ceinture de cellules responsables de la croissance radiale de l'arbre et située juste sous l'écorce). L'épaisseur d'écorce est corrélée à la dimension du tronc, plus elle est épaisse plus le cambium est protégé. La mortalité finale à l'échelle du peuplement est calculée pour chaque famille de simulation et chaque essence forestière.

Le hêtre est une essence réputée

« sensible au feu » du fait de son écorce fine, et les résultats obtenus par Dupire et al. (2019) le confirment. La mortalité individuelle de cette essence varie énormément en fonction de son épaisseur d'écorce. Le pin cembro a aussi une écorce assez fine et il est classé comme « intolérant au feu ». Il a aussi une faible récupération, proche de celle de l'épicéa. Les pyrorrégions jouent un rôle dans l'intensité du front de flamme et la vitesse de propagation du front de flamme : elles sont plus fortes dans les Alpes du sud, surtout à altitude inférieure à 800 m. Les feux de saison froide (50% du total) ont un impact limité sur les peuplements de basse altitude des Alpes du Sud, dominés par les chênes et le pin sylvestre. La mortalité est nettement plus élevée en été (75 % du total) dans la pyrorrégion des forêts mélangées de basse altitude. Les conditions météo les plus chaudes provoquent une augmentation de la mortalité, sauf pour les espèces ayant une forte adaptation au feu de surface (écorce épaisse et houppier très haut) comme le mélèze. Le pin noir et le pin sylvestre sont des essences réputées résistantes au feu du fait d'une écorce épaisse, cela a été confirmé par un fort taux de survie. Le pin cembro et le pin à crochets sont parmi les espèces les plus sensibles au feu dans les Alpes, du fait de leur écorce fine mais aussi de la base de leur houppier, qui est basse.

La vulnérabilité des forêts au feu résulte des effets combinés de différentes variables climatiques, biotiques et génétiques. Les différentes pyrorrégions alpines



(Figure 3) Taux de mortalité modélisés sur les parcelles NFI en fonction des conditions climatiques et des zones biogéographiques. 1. Alpes du Nord ≤ 800 m, 2. Alpes du Nord > 800 m, 3. Alpes du Sud ≤ 800 m, 4. Alpes du Sud > 800 m (a) et des types de peuplements forestiers : Cp-Taillis, Br-Feuillus purs, Mx- Peuplements mixtes, Cf-Purs résineux (b). Les boîtes à moustaches rassemblent les résultats avec les deux temps de séjour de la flamme et avec les trois équations de mortalité cambiale.- © INRAE, UGA

ont permis de souligner la forte mortalité dans le cas de conditions météo sévères, à basse altitude, dans les zones méditerranéennes à forêts feuillues, et pour des espèces ayant une écorce fine ou des houppiers faiblement développés (notamment dans les taillis).

LES ZONES BIOGÉOGRAPHIQUES SOUS LA CONTRAINTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les environnements montagneux sont particulièrement sensibles aux variations climatiques (Knight, 2022). Dupire et al. (2017) ont analysé quels peuvent être les changements en termes de risque incendies de forêts dans les Alpes françaises, du fait des changements climatiques globaux. Des bases de données météorologiques fiables existent pour la période depuis 1959 pour les Alpes (Figure 4). L'approche généralement utilisée consiste à calculer quotidiennement et sur le long terme un indice de « météo-feu » (fire weather index, en anglais). Cet indice composite (il combine six sous-indices) permet de mesurer la quantité quotidienne en eau dans la végétation, et l'intensité potentielle du feu qui peut en résulter. À partir de ces données, on peut estimer quel est le degré d'inflammabilité de la végétation (Stocks et al., 2009). Cette approche existe depuis les années 1980, sous l'impulsion du service des forêts canadiennes (CFFDRS). Les relevés quotidiens sur le terrain sur une large étendue de forêts

leur permettent d'estimer différents indices au midi solaire : l'indice de combustible fin permet de connaître l'humidité de la litière au sol (de 0 à 100%), alors qu'un autre indice d'humidité est mesuré dans la litière en décomposition, et un autre dans les horizons organiques profonds du sol. Ces indices sont complétés par d'autres, mesurés en surface et dans l'air. Ces indices sont combinés pour obtenir une probabilité de départ de feu dans la végétation.

L'analyse des résultats sur les Alpes françaises a montré un contraste important entre les Alpes du Sud avec un danger météo incendie élevé en moyenne et une augmentation significative au cours des dernières décennies, et les Alpes du Nord avec un danger faible à modéré en moyenne qui a augmenté seulement à basse altitude. Par contre, une année exceptionnellement sèche comme 2003 a fait augmenter l'indice forêt-météo dans l'ensemble des Alpes françaises. Cette étude contribue à la compréhension des conséquences des changements climatiques en cours sur les incendies de forêt dans les Alpes françaises. Il a produit des résultats à haute résolution qui tiennent compte de la topographie et du climat, fortement variables sur le territoire. Ces résultats sont utiles pour la prédiction quotidienne du danger météo de feu dans les Alpes, et la préparation des pompiers.

RÉFÉRENCES

Curt, T., Fréjaville, T. & Bouillon, C. (2014) Characterizing pyroregions in south-eastern France. Caractérisation de pyrorégions dans le sud-est de la France. *Advances in Forest Fire Research*. Chapter 4 - Fire Risk Assessment and Climate Change, pp. 1093-1101. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, PRT.

Dupire, S., Curt, T. & Bigot, S. (2017) Spatio-temporal trends in fire weather in the French Alps. *Science of the total environment*, 595, 801-817.

Dupire, S., Curt, T., Bigot, S. & Fréjaville, T. (2019) Vulnerability of forest ecosystems to fire in the French Alps. *European Journal of Forest Research*, 138, 813-830.

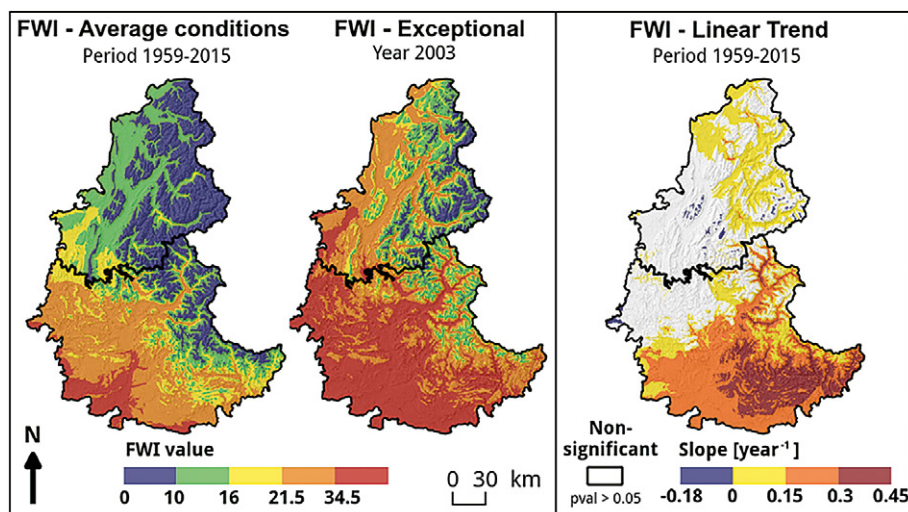
Finney, M.A. (2005) The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management*, 211, 97-108.

Galizia, L.F., Curt, T., Barbero, R. & Rodrigues, M. (2021) Understanding fire regimes in Europe. *International Journal of Wildland Fire*, -.

Jiménez-Ruano, A., Rodrigues Mimbrero, M. & Riva Fernández, J.d.I. (2018) Identifying pyroregions by means of Self Organizing Maps and hierarchical clustering algorithms in mainland Spain. Identifying pyroregions by means of Self Organizing Maps and hierarchical clustering algorithms in mainland Spain. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Knight, J. (2022) Scientists' warning of the impacts of climate change on mountains. *PeerJ*, 10, e14253.

Stocks, B., Lawson, B., Alexander, M., Van Wagner, W., McAlpine, R., Lynham, T. & DE, D. (2009) The Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview. *The Forestry Chronicle*, 65, 1-8.



(Figure 4) Cartes de l'intensité du temps de feu observé durant la période 1959-2015. Les valeurs annuelles prises en compte dans ces cartes étaient les valeurs annuelles au 95e centile observées pour chaque cellule. Les conditions moyennes représentent la moyenne des valeurs annuelles observées sur la période 1959-2015 (carte de gauche). Les valeurs exceptionnelles correspondent aux valeurs annuelles observées sur l'année sèche 2003 (carte du centre). Les tendances temporelles observées sur la période 1959-2015 ont été cartographiées sur la colonne de droite pour chaque indice. Les tendances significatives (valeur de $p \leq 0,05$) sont représentées en couleurs, les tendances non significatives sont représentées en blanc. - © Sylvain Dupire, INRAE