

Firelihood : une modélisation probabiliste de l'activité des feux de forêt

par François PIMONT, Thomas OPITZ et Jean-Luc DUPUY

***Face à l'augmentation du risque
lié aux feux de forêt,
il est aujourd'hui crucial
de comprendre et anticiper
l'aléa feu de forêt.
Firelihood est un modèle
probabiliste qui a été développé
par l'INRAE pour étudier
et prédire l'activité feux de forêt.
Il est capable de simuler sur
une région et une période données,
des occurrences et surfaces
brûlées vraisemblables en fonction
des conditions météorologiques,
des caractéristiques de couverture
et des utilisations du milieu.***

Contexte

Les feux de forêt font régulièrement l'objet d'une attention particulière dans les médias lors des événements marquants, comme le grand feu de Gonfaron dans le Var en août 2021, les feux des Landes de l'été 2022, ou d'autres feux catastrophiques se propageant ailleurs en Europe, en Amérique du Nord ou en Australie. Cependant, ces grands feux ne sont que la partie émergée de l'iceberg. Pendant la période estivale, une centaine de feux de forêts éclosent et commencent à se propager chaque semaine dans le sud-est de la France, suite à des éclosions liées à des causes variées. La plupart est rapidement maîtrisée grâce à une politique de prévention et de lutte efficace, mais certains feux vont « échapper » à l'attaque sur feu naissant pour franchir le seuil symbolique d'un hectare, typiquement entre 4 et 30 feux par semaine. Différents facteurs vont ensuite contribuer à l'émergence de feux de plus en plus rares, mais aussi de plus en plus grands, dépassant parfois 1000 ha. Ces grands feux finiront par constituer la majorité de la surface brûlée annuelle.

Comprendre et anticiper l'aléa feu de forêt au sein d'un territoire nécessite d'appréhender le phénomène dans son ensemble, c'est-à-dire d'intégrer les facteurs permettant aux différents stades de développement des incendies de se produire. Les méthodes statistiques modernes, en particulier la théorie des valeurs extrêmes et les nouveaux outils de modélisation qui en résultent, permettent d'appréhender le caractère imprévisible de l'activité des feux à l'échelle régionale de manière probabiliste. Ces outils, dont la nature diffère fondamentalement de celle des modèles de propagation, permettent d'intégrer les

- 1 - INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.
- 2 - URFM : unité de recherches Ecologie des forêts méditerranéennes.
- 3 - BioSP : Biostatistique et processus spatiaux.
- 4 - FCPR : formation complémentaire par la recherche des ingénieurs de l'agriculture et de l'environnement

différents facteurs associés aux feux de forêts, qu'ils soient liés à la météorologie, au climat, au milieu naturel ou aux activités humaines.

Qu'est-ce que Firelihood ?

Firelihood est un modèle développé à INRAE¹ par les unités URFM² et BioSP³ afin d'étudier et prédire l'activité feux de forêts dans le sud-est de la France. Il a été initialement développé dans le cadre d'une thèse FCPR⁴ financée par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, pour anticiper les effets du changement climatique sur les incendies de forêts (FARGEON 2019). Le nom « Firelihood » provient de la contraction de l'anglais « Fire » qui veut dire feu et « Likelihood » qui veut dire vraisemblance, et souligne ainsi le caractère probabiliste du modèle. Firelihood permet en effet de simuler les patrons spatio-temporels d'activité de feu de la manière la plus vraisemblable possible (PIMONT *et al.* 2021). Il fonctionne à l'échelle journalière et

dans des pixels dont la taille varie typiquement entre 2 et 8 km de côté. Ce modèle simule successivement l'apparition de feux supérieurs à 1 ha, puis la superficie finale parcourue par chacun de ces feux. Cette approche permet de distinguer d'un côté les facteurs de l'éclosion et de la propagation initiale et de l'autre les facteurs de la propagation qui conduisent ces feux à parcourir des superficies plus grandes. Ces probabilités sont estimées à partir de différentes variables explicatives, comme le danger feu météo (IFM — ou FWI en anglais — quotidiennement calculé par Météo-France) et la surface combustible et des données issues de la base Prométhée, qui recense les observations de feux en zone Sud-Est. Une carte d'IFM pour le sud-est de la France, calculé à 8 km de résolution à partir des données de réanalyse SAFRAN (VIDAL *et al.* 2010) pour le 9 août 2017 est présentée à titre d'illustration sur la Figure 1. D'autres versions du modèle intègrent davantage de variables représentatives des usages humains (interface habitat-forêt, route, etc.) ou du milieu (type de combustible, topographie, etc.).

La Figure 2 illustre certaines sorties de

9 août 2017

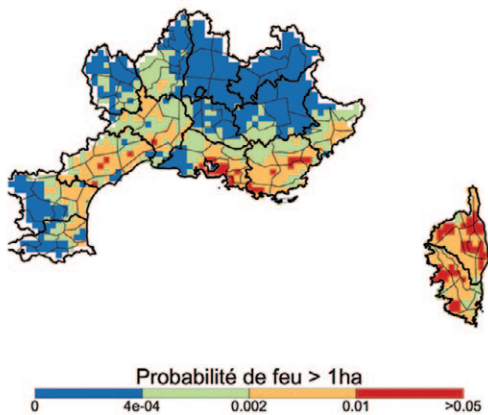


Fig. 1 (ci-contre, à gauche) :

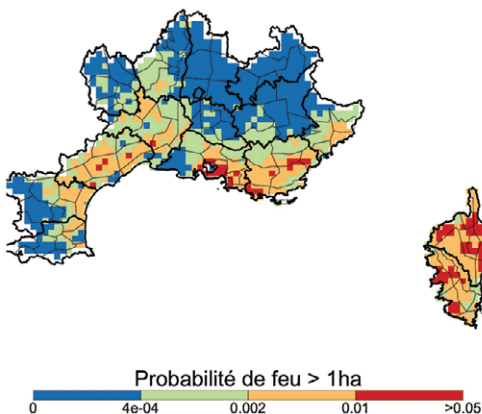
Exemple de carte d'IFM servant de données d'entrée à Firelihood. Il s'agit d'une carte de danger météorologique incendie, calculé à partir de la réanalyse météorologique SAFRAN (résolution 8 km) pour le 9 août 2017. Elle illustre une journée présentant un danger météorologique très élevé dans le delta du Rhône et le sud du Var.

Fig. 2 (ci-dessous) :

Exemple de sortie « brute » de Firelihood pour le 9 août 2017: à gauche (a) Occurrence des feux >1ha ; à droite (b) Probabilité qu'un tel feu devienne grand (i.e. excède 100 ha).

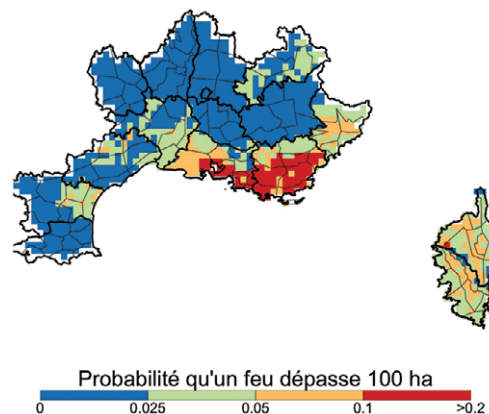
9 août 2017

a



9 août 2017

b



simulation de Firelihood correspondant aux conditions d'IFM de la Figure 1, avec l'occurrence des feux (probabilité d'un feu > 1ha) et la probabilité de dépassement du seuil de 100 ha (grand feu). Ces deux cartes montrent que l'IFM traduit imparfaitement les activités des feux à lui seul. En effet, on note une plus forte probabilité d'avoir des feux supérieurs à 1ha localement (notamment en Corse et dans le nord-ouest de la zone Prométhée), malgré des IFM plus faibles que dans d'autres parties de la zone. À l'inverse, les probabilités que ces feux deviennent très grands peuvent être plus faibles, par exemple en Corse que dans le Var, en raison du danger météorologique plus faible ce jour-là. Ces probabilités sont également plus élevées dans l'est de l'Aude que dans les départements voisins, malgré des niveaux d'IFM comparables. Ces différences s'expliquent par des spécificités locales concernant la mise en œuvre de la politique de prévention et de lutte, mais aussi des différences liées à la végétation, au relief ou encore aux activités humaines. Ainsi, le modèle probabiliste permet d'objectiver le rôle de ces différents facteurs, mais aussi de corriger certains biais spatio-temporels de l'IFM.

On notera que le modèle ne simule pas uniquement la probabilité qu'un feu excède 100 ha, mais l'ensemble des tailles possibles (c'est la « distribution » de la taille), ce qui permet de calculer des probabilités pour d'autres seuils (par exemple 10, ou 1000 ha), mais aussi la surface brûlée attendue. En pratique, le modèle réalise des simulations de centaines d'activités de feux possibles pour une zone et une période données en réalisant des tirages aléatoires, ce qui permet d'estimer des intervalles de confiance pour les nombres de feux ou les surfaces attendus et de prendre explicitement en compte la dimension stochastique du phénomène feu de forêts.

Firelihood permet d'affiner la prédiction du danger feux de forêts

Les sorties brutes présentée sur la Figure 2 illustrent le potentiel de Firelihood pour la cartographie du danger quotidien. En effet, grâce aux données météorologiques, le modèle peut objectivement hiérarchiser les zones du territoire les plus sujettes à ce que :

(1) des feux échappent, (2) un feu qui auraient échappé devienne grand. En pratique, on pourra noter que même pour un jour à risque exceptionnel comme le 9 août 2017, les probabilités d'occurrence les plus élevées au niveau de chaque pixel sont très faibles (rarement supérieure à 1%). À ces échelles très fines, l'occurrence, en tant que processus statistique demeure trop aléatoire pour prétendre prédire à coup sûr qu'un feu va échapper dans tel pixel tel jour de l'année. En revanche, il permet d'identifier les zones les plus à risque. Par ailleurs, la probabilité qu'un feu qui échappe devienne un grand feu (c'est-à-dire qu'il dépasse 100 ha) peut excéder 20 %, ce qui rend le phénomène fortement probable, fournissant une information utile en termes d'organisation de la prévention et de la lutte.

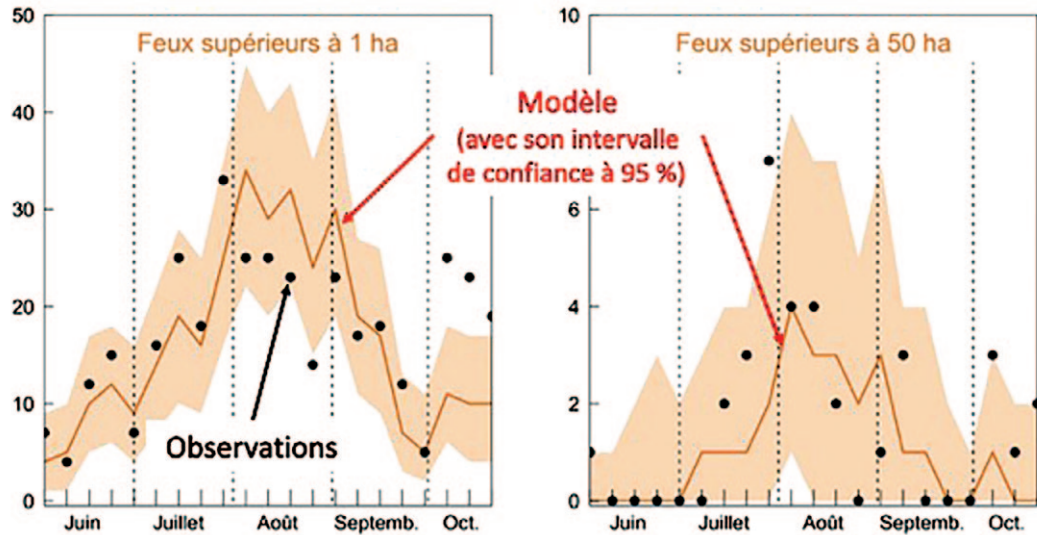
Si l'on s'intéresse à des échelles spatiale et temporelle moins fines que le pixel et le jour, les événements deviennent prédictibles avec plus de précision. Par exemple, les événements qui se produisent dans l'ensemble de la zone Prométhée une semaine donnée sont le fruit de l'agrégation des événements se produisant dans chaque pixel de la zone pour chaque jour de la semaine. Chaque événement individuel a une probabilité de réalisation faible, donc demeure impossible à prédire. En revanche, le nombre total de ces événements peut devenir prédictible. Par exemple, la figure 3 (gauche) montre qu'il est possible de prédire (en orange) le nombre de feux qui échappent (>1 ha) dans l'ensemble de la zone Sud-Est à l'échelle hebdomadaire avec un intervalle de confiance raisonnablement étroit (orange clair). En effet, les observations issues de Prométhée (en noir) se trouvent dans l'intervalle de confiance dans près de 95% des cas (ce qui est l'objectif). Il est même possible d'estimer l'ordre de grandeur du nombre de feux de plus de 50 ha (Cf. Fig. 3, droite), même si les nombres observés (en général inférieurs à 7) sont souvent un peu faibles pour être prédits avec précision.

Cette agrégation hebdomadaire des résultats est pertinente d'un point de vue opérationnel, car elle est cohérente avec la précision des prévisions climatiques — en général fiable à ces horizons — mais aussi avec la préparation des dispositifs opérationnels qui est planifiée également sur une base hebdomadaire. L'utilisation du modèle en prévision pourrait donc permettre d'anticiper avec une assez grande précision le nombre d'événements à venir au niveau zonal.

Fig. 3 :

Exemple de simulations de Firelihood agrégées à l'échelle hebdomadaire et pour l'ensemble de la zone Prométhée pour la saison estivale 2017 : (a) nombre de feux >1 ha ; (b) nombre de feux >50ha. Les sorties du modèle sont présentées en orange (orange pour l'espérance et orange clair pour l'intervalle de confiance à 95%). Les points noirs constituent les observations issues de Prométhée. Cet exercice d'agrégation spatio-temporelle démontre que les probabilités simulées à l'échelle du pixel jour (Fig. 2) représente bien le processus sous-jacent au phénomène feu de forêt tel qu'observé dans le Sud-Est de la France, puisque les observations se trouvent bien dans l'intervalle de confiance des prédictions du modèle à une fréquence proche de 95 %. La saison 2017 est présentée ici à titre d'illustration, mais le modèle fonctionne bien sur l'ensemble des saisons récentes.

Nombre de feux hebdomadaires en 2017



Firelihood permet de cartographier l'occurrence des feux de forêt

L'activité des feux de forêt varie beaucoup dans l'espace. Cartographier l'occurrence à l'échelle régionale présente donc un enjeu stratégique afin d'orienter les politiques de gestion du territoire. Ces évaluations sont toutefois difficiles du fait du caractère aléatoire du phénomène feu de forêts, ainsi que des variations naturelles du climat. Par exemple, le nombre de feux observé sur la période 1993-2018 est nul dans la plupart des carreaux DFCI de la grille Prométhée (Cf. Fig. 4b), alors que la probabilité d'occurrence ne l'est pas. L'approche probabiliste permet de dépasser cette difficulté, en fournissant une carte des occurrences simulée (Figure 4a) paradoxalement beaucoup plus représentative de la composante occurrence de l'aléa, que celle issue de la simple observation empirique du phénomène. Dans les simulations, le nombre de feux attendu en moyenne n'est jamais nul dans les carreaux DFCI — bien que parfois très faible — même si aucun feu n'y a été observé en 26 ans.

D'autres applications du modèle concernent l'estimation des périodes de rotation du feu, c'est-à-dire du temps nécessaire au feu pour brûler une surface équivalente à la forêt présente dans un pixel donné. Cette caractéristique des régimes des feux permet de quantifier la récurrence des feux sur les différents écosystèmes.

Firelihood permet de projeter l'impact du changement climatique sur l'activité feux de forêts

Le facteur explicatif principal du niveau de danger quotidien local dans Firelihood est l'IFM, qui intègre les effets de la température, du vent, des précipitations et de l'humidité de l'air sur le niveau de danger incendie. Il est donc naturellement possible de projeter les activités de feu dans le futur grâce aux sorties des modèles climatiques régionalisés. C'est d'ailleurs dans cet objectif que le modèle a été initialement développé, les projections d'indice de danger comme l'IFM sous climat futur s'avérant délicates à traduire en termes de surfaces brûlées ou de nombres de feux à attendre dans le futur (FARGEON 2019). Ces projections suggèrent une forte augmentation de l'activité des feux dans la région Sud-Est, en particulier celle des grands feux et des surfaces brûlées qui pourraient presque tripler d'ici la fin du siècle, dans le cas du scénario RCP 8.5. Cette augmentation se traduirait à la fois par une intensification dans la plaine mais aussi par une expansion dans l'arrière-pays (Cf. Fig. 5) et un allongement des saisons de feux (PIMONT *et al.* 2022).

Ces résultats supposent toutefois que la relation entre activité des incendies et météorologie modélisée par Firelihood demeure constante dans le futur. Cette hypothèse est sujette à caution, car la mortalité de la végétation due à la sécheresse devrait

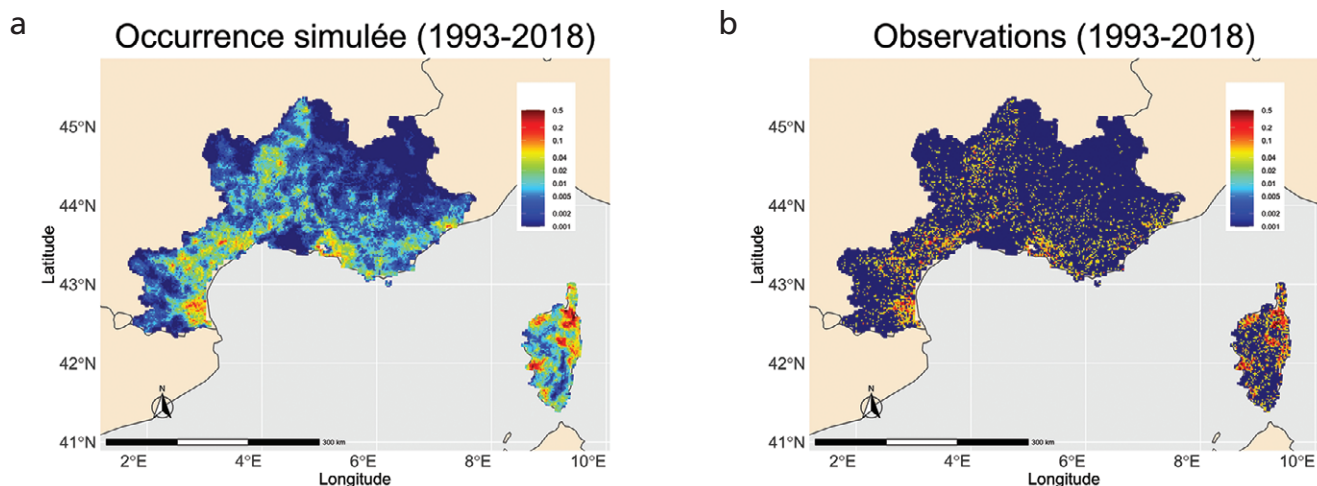


Fig. 4 (ci-dessus) :

Carte d'occurrence sur la période 1993-2018 : (a) Nombre de feu annuel moyen attendu par carreau DFCI de 2km selon Firelihood (en moyennant 100 réalisations vraisemblables) (b) Nombre de feux observé dans la base Prométhée (moyenne annuelle). La comparaison des deux cartes souligne l'intérêt du modèle pour estimer l'occurrence, y compris dans des carreaux où aucun feu n'a été observé sur la période : l'occurrence n'est jamais nulle, mais elle peut être 10 à 100 fois plus faible que sur d'autres zones du territoire pourtant distante de seulement une dizaine de kilomètres.

fortement s'accroître, modifiant profondément le combustible. Des incertitudes importantes existent également concernant l'évolution des activités humaines, qu'il s'agisse de l'usage des sols ou des mesures de prévention et de lutte. Ces facteurs pourraient amplifier ou atténuer les augmentations projetées.

Pour aller plus loin : le modèle permet-il uniquement de simuler les activités de feux ?

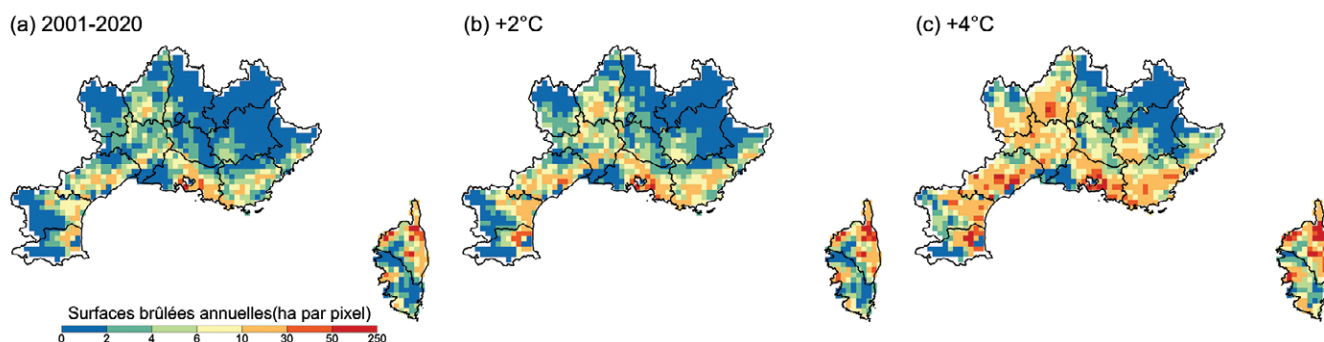
L'intérêt de l'approche Firelihood ne réside pas uniquement dans les qualités prédictives du modèle. L'analyse des fonctions de réponses aux différents facteurs (météorologiques, climatique, caractéristique des milieux naturels ou des usages humains) permet de comprendre et de quantifier l'importance de ces différents facteurs.

Par ailleurs, Firelihood intègre un modèle spatio-temporel performant pour intégrer de manière vraisemblable les effets statistiques non expliqués par les facteurs explicitement intégrés dans le modèle. Cette composante est indispensable pour reproduire de manière réaliste les observations et bien

estimer les réponses. L'analyse de ce modèle spatio-temporel permet de quantifier et d'attribuer les variations de la relation feu-climat à travers le temps et l'espace. Par exemple, on a pu montrer que l'occurrence d'un feu >1 ha avait diminué d'un facteur 2 à 3 entre la décennie 1990 et la décennie 2010 à niveau de danger météorologique (IFM) égal, ceci pouvant essentiellement être attribué à l'amélioration des politiques de prévention et de lutte. Malheureusement, le modèle révèle aussi une stagnation de l'efficacité de ces politiques au cours la dernière

Fig. 5 (ci-dessous) :

Evolution des surfaces brûlées sous l'effet du changement climatique attendue en zone Prométhée avec +2 ou +4°C de réchauffement global. Les surfaces brûlées sont exprimées en moyenne annuelle sur des périodes de 20 ans, en ha par pixel SAFRAN de 8 km de côté. L'augmentation attendue se traduit à la fois par une expansion spatiale, une intensification dans les zones déjà concernées et aussi un allongement de la saison de feu (non présenté ici). Dans les projections climatiques utilisées ici, +2°C de réchauffement global serait atteint en 2040. +4°C serait atteint en 2085, selon un scénario d'émission correspondant au RCP 8.5.



Remerciements : Nous remercions l'Agence DFCI de l'Office national des forêts pour les échanges très pertinents autour de la construction du modèle et de ses résultats, et pour les données fournies, Météo-France pour les données climatiques de réanalyse Safran à 8 km et les ministères de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire et de la Transition écologique (financements FCPR, étude dans le cadre de l'actualisation du rapport Chatry de 2010 et SRNH sur la caractérisation de l'occurrence).

François PIMONT
INRAE
francois.pimont
@inrae.fr

Thomas OPITZ
thomas.opitz@inrae.fr

Jean-Luc DUPUY
jean-luc.dupuy
@inrae.fr

Autres contributions :
INRAE URFM :

Hélène FARGEON,
Jorge
CASTEL-CLAVERA,
Julien RUFFAULT,
Nicolas MARTIN
et Eric RIGOLOTT

INRAE RECOVER :
Renaud BARBERO

décennie, avec même une régression dans la partie ouest du bassin méditerranéen. On montre également que la probabilité qu'un feu devienne grand n'a pas diminué depuis 1990 — elle a même légèrement augmenté sur les dernières années. Ces éléments, publiés dans la revue *International Journal of Wildland Fire* (CASTEL-LAVERA *et al.* 2022), illustrent les difficultés à progresser dans la lutte contre les grands feux, dont le nombre devrait malheureusement augmenter sous l'effet du changement climatique.

Perspectives de développement de Firelihood

Les travaux les plus récents ont permis d'intégrer de manière plus explicite l'impact des activités anthropiques et de l'organisation du territoire, et même certaines métriques associées à la prévention et à la lutte. Sur le plus long terme, l'amélioration des projections climatiques devra passer par la prise en compte des dynamiques de végétations combustibles, ainsi que leur interaction avec l'activité des feux.

Différents projets de recherches démarrant en 2022 devraient permettre de dépasser les limites de l'IFM, améliorer la prise en compte des événements extrêmes, mais aussi étendre l'approche aux feux d'hiver et à d'autres régions en Europe. Il est notamment prévu d'étendre l'approche aux départements de l'ex région Aquitaine dans le sud-ouest de la France. Ces travaux contribuent également à une étude pour le compte du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, dans le cadre de la mission interministérielle d'actualisation du rapport 2010 portant sur l'extension de la zone à

risque incendie de forêts sous les effets du changement climatique (CHATRY *et al.* 2010). Cette étude devrait être finalisée fin 2022 et apportera de nombreux éléments complémentaires à ceux présentés succinctement ici sur les effets attendus du changement climatique, en particulier pour la région méditerranéenne.

Références

L'ensemble des références scientifiques les plus récentes en lien avec le modèle Firelihood sont présentées :

- <https://www.researchgate.net/project/Firelihood-a-probabilistic-framework-for-fire-activity-modelling>
Castel-Clavera J, Pimont F, Opitz T, Ruffault J, Rivière M, Dupuy JL (2022) Disentangling the factors of spatio-temporal patterns of wildfire activity in south-eastern France - *International Journal of Wildland Fire* - <https://doi.org/10.1071/WF22086>
Chatry C, Le Gallou J, Le Quentrec M, Lafitte J, Laurens D, Creuchet D, Grelu, J (2010) Rapport de la mission interministérielle Changements climatiques et extension des zones sensibles aux feux de forêts. Rapport Min. Alimentation Agriculture Pêche n° 1796. (Paris)
Fargeon H (2019) Effet du changement climatique sur l'évolution de l'aléa incendie de forêt en France métropolitaine au XXI^e siècle. Thèse de doctorat, Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), INRA, UR 629 – Écologie des forêts méditerranéennes.
Pimont F, Fargeon H, Opitz T, Ruffault J, Barbero R, Martin-StPaul N, Rigolot E, Rivière M, Dupuy J (2021) Prediction of regional wildfire activity in the probabilistic Bayesian framework of Firelihood. *Ecological Applications*. doi:10.1002/eap.2316
Pimont F, Ruffault J, Opitz T, Fargeon H, Barbero R, Castel-Clavera J, Martin-StPaul N, Rigolot E, Jean-Luc Dupuy JL (2022) Future expansion, seasonal lengthening and intensification of fire activity under climate change in southeastern France - *International Journal of Wildland Fire* - <https://doi.org/10.1071/WF22103>
Vidal J-P, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M, Soubeyrou J-M (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30, 1627–1644. doi:10.1002/joc.2003.

Résumé

Firelihood : une modélisation probabiliste de l'activité des feux de forêt

Firelihood est un modèle probabiliste d'activité des feux de forêt, capable de simuler dans une région et une période données, des occurrences et des surfaces brûlées vraisemblables en fonction des conditions météorologiques, de l'occupation des sols et des caractéristiques de la couverture végétale. Le modèle repose sur une estimation probabiliste des réponses à ces facteurs par inférence bayésienne à partir des observations (base de données Prométhée). Ces techniques permettent au modèle de bien reproduire les observations. Firelihood permet de caractériser le danger journalier et hebdomadaire d'incendie par des métriques opérationnelles (nombre de feux et surfaces brûlées attendus), et de le prévoir si on l'alimente avec des prévisions météorologiques. Initialement développé pour anticiper les effets du changement climatique sur l'activité des feux, il a permis de quantifier l'expansion de la zone à risque dans le sud-est de la France, ainsi que l'allongement attendu de la saison estivale de feu. Selon les scénarios climatiques, on pourrait assister à un triplement des feux de plus de 100 ha, en supposant le maintien de l'efficacité de la prévention et la lutte. Ce modèle permet aussi de réaliser des analyses rétrospectives pour mieux comprendre l'évolution des régimes de feux observés au cours des dernières décennies. Dans le contexte du projet européen FIRE-RES (Green Deal), Firelihood est actuellement étendu aux départements de l'ex Aquitaine, ainsi qu'à différentes régions d'Europe.