Chapitre 2 : L'aléa incendie de végétation

Résilience des interfaces urbaines face aux incendies de végétation en contexte de changement climatique

Rapport de l'expertise scientifique collective

II. L'aléa incendie de végétation

Table des matières du chapitre II

II. L'aléa incendie de végétation 61

1. Introduction 63

1.1. Le combustible végétal au cœur des mécanismes de propagation du feu 63

1.2. Du feu aux incendies de végétation et à leur signature spatio-temporelle 64

1.3. La problématique des grands incendies 65

1.4. L'aléa incendie comme conjonction de facteurs biophysiques et anthropiques 65

1.5. Présentation du corpus du chapitre 66

2. Les composantes de l'aléa incendie de végétation 66

2.1. Notion de facteurs limitants 67

2.2. Concept de régime de feu 68

2.2.1. Rôle des facteurs anthropiques 69

2.2.2. Échelle d'analyse des régimes de feu et de leur évolution 70

2.3. Combustible végétal et l'aléa structurel 70

2.3.1. Caractéristiques des combustibles morts et vivants 71

2.3.2. Structure verticale des combustibles 74

2.3.3. Continuité des combustibles à l'échelle du paysage 74

2.3.4. Les processus qui façonnent la structure des combustibles 75

2.4. L'aléa météorologique et les sécheresses 76

2.4.1. Le vent comme principal moteur de propagation des incendies 76

2.4.2. Le rôle conjoint de la température et de l'humidité de l'air 77

2.4.3. Les précipitations et les effets de leur temporalité 78

2.4.4. Les sécheresses, un facteur intégrateur entre météorologie, combustibles et incendies 78

2.4.5. Les situations météorologiques propices aux comportements extrêmes des incendies 80

2.5. L'aléa d'éclosion et les spécificités des interfaces 81

2.5.1. Les causes de départs de feu 81

2.5.2. Le rôle des infrastructures et de la pression anthropique 83

2.5.3. Les interfaces ville — espace naturel comme zone de convergence de l'aléa incendie 84

2.5.4. Distinction entre aléa d'éclosion et propagation 85

2.5.5. Implications pour la prévention 86

2.6. Mesurer et caractériser l'aléa incendie 88

2.6.1. La notion d'évènements extrêmes 88
2.6.2. Indices de danger incendie 89
2.6.3. Limites des indices de danger incendie et approches probabilistes complémentaires 90
2.6.4. Vers une évolution des régimes de feu 92
3. Lacunes de connaissances et controverses 93
4. Conclusion 93
5. À retenir 94
6. Liste de références du chapitre II 96

Essentiels

La végétation est combustible : c'est le point essentiel de l'aléa incendie. L'énergie disponible dépend de la quantité d'eau à évaporer (teneur en humidité) et de la charge en combustible. Sa compacité (herbes, branches, troncs) détermine la vitesse de combustion et l'inflammabilité. **L'occurrence d'un incendie suppose la combinaison d'une source d'allumage, de combustibles connectés, de déficit hydrique (sécheresse) et des conditions météorologiques favorables à la propagation.**

Une très faible part des événements concentre la grande majorité des conséquences. La littérature les qualifie **d'événements extrêmes en raison de cette rareté statistique**.

En Europe, une large part des incendies est d'origine humaine, dont une grande majorité relève de la négligence. L'aléa est donc très fortement lié aux concentrations de population, aux activités et aux infrastructures urbaines ou périurbaines. En ce sens, **l'incendie de végétation peut être considéré comme un phénomène autant urbain que rural.** En France, en moyenne, les deux tiers des incendies éclosent aux interfaces ville — espace naturel.

Les incendies résultent de facteurs à la fois biophysiques et anthropiques, les dynamiques socio-économiques — déprise agricole, exode rural, expansion urbaine — expliquent une grande partie des évolutions récentes des régimes d'incendie, en favorisant localement l'accumulation des combustibles et l'extension des interfaces.

L'indice forêt-météo constitue une base opérationnelle robuste pour la caractérisation du danger incendie en France. Son intégration dans une démarche plus globale et multifactorielle, incluant la structure et l'état des combustibles, les conditions de vent extrême et les facteurs anthropiques, permettrait de mieux appréhender l'aléa incendie dans toute sa complexité et aux différentes échelles de décision.

1. Introduction

L'analyse des incendies de forêt et de végétation s'inscrit dans le cadre plus général de la gestion des risques naturels. Le risque résulte de l'interaction entre l'aléa et la vulnérabilité. L'aléa correspond à la probabilité statistique d'occurrence de phénomènes dommageables et à leurs caractéristiques potentielles telles que l'intensité, la vitesse de propagation, l'étendue spatiale ou la durée de l'incendie. Tandis que la vulnérabilité est la propension d'un enjeu — humain, matériel, économique ou environnemental — à subir des dommages sous l'effet d'un aléa donné[1].

Le présent chapitre se focalise sur la composante de l'aléa incendie. Les dimensions relatives à la vulnérabilité des enjeux exposés sont développées dans le Chapitre 3, Vulnérabilité.

1.1. Le combustible végétal au cœur des mécanismes de propagation du feu

L'aléa incendie de végétation recouvre l'ensemble des processus conduisant à l'éclosion, à la propagation et, dans certains cas, au développement de feux de grande ampleur et/ou à forts impacts. La combustion du végétal est au cœur de ces processus. Elle devient possible dès lors que le végétal est soumis à une source de chaleur suffisante pour évaporer l'eau qu'il contient puis atteindre sa température de pyrolyse. Celle-ci libère alors des gaz inflammables qui s'oxydent au contact de l'air et produisent des flammes. Ces flammes transmettent de la chaleur sous forme de rayonnement, par convection et par contact direct au végétal adjacent, qui peut à son

[1] GIEC (2022). Changement climatique 2022 : Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au sixième Rapport d'évaluation du GIEC.

tour être dégradé thermiquement et atteindre son point d'ignition. La propagation correspond ainsi au passage du feu d'un élément combustible à un autre, sous l'effet d'une réaction en chaîne combinant transferts de chaleur, pyrolyse et combustion. Cette réaction en chaîne se poursuit tant que du végétal combustible est disponible. La propagation s'accélère en présence de vent et de relief qui renforcent les transferts de chaleur entre les flammes et le combustible végétal, conduisant à des vitesses de propagation et des intensités de feu plus fortes (Finney et al. 2021). Le triptyque combustibles-météorologie-relief est couramment désigné dans la littérature comme le « triangle du comportement du feu » (Werth et al. 2016).

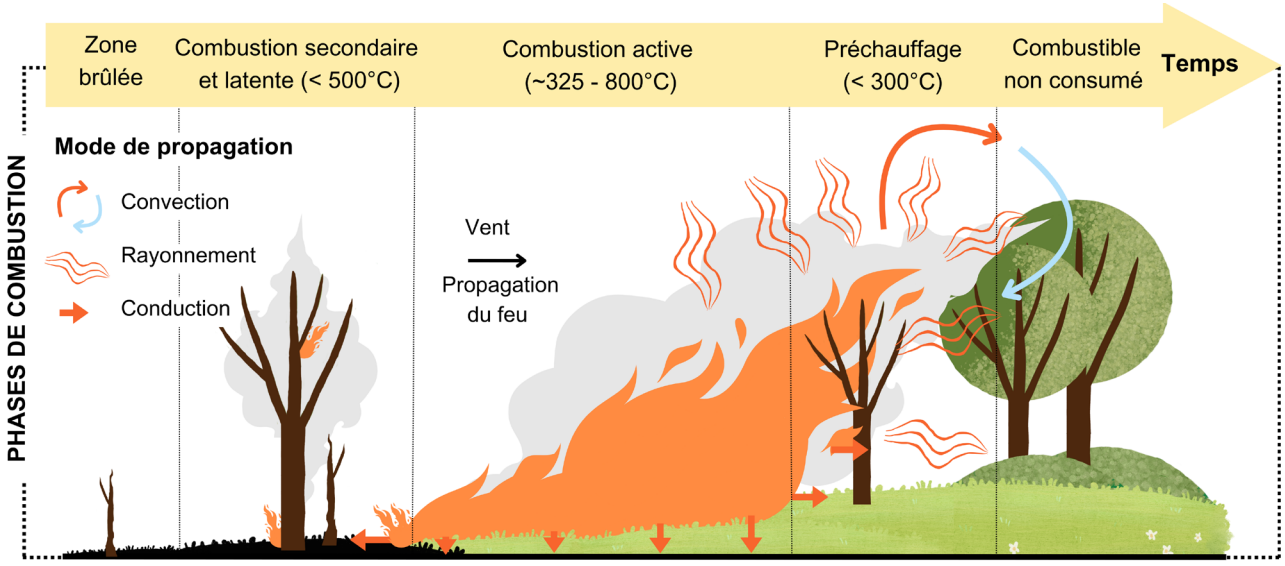


Figure 1 : Schéma de la propagation du feu, résultat de l'enchaînement de la dégradation thermique du combustible végétal (pyrolyse), de la combustion et des transferts thermiques induits (convection, rayonnement, conduction). Issu du rapport VULNEFEU [2] rédigé par l'Office National des Forêts et l'INRAE (figure produite par C. Revertegat).

1.2. Du feu aux incendies de végétation et à leur signature spatio-temporelle

Dans les milieux naturels, l'accumulation de combustibles liée à la croissance des plantes, à leur possible sénescence voire dépérissement, alimente l'aléa feu. Le feu constitue historiquement un processus écologique naturel, jouant à la fois un rôle de régulateur et de perturbateur des écosystèmes (voir Chapitre 5, Changements globaux). Lorsque ce feu survient de manière non souhaitée ou échappe au contrôle, il devient un incendie de végétation.

En Europe, les incendies sont principalement concentrés et récurrents dans la région euro-méditerranéenne. Le Portugal, l'Espagne, la France, l'Italie et la Grèce sont les pays les plus touchés. Les écosystèmes y sont majoritairement composés d'espèces pyrophytes, qui ont coévolué avec la perturbation du feu et pour lesquelles il existe des mécanismes de résistance (e.g. écorce épaisse comme pour le chêne-liège) et de résilience (capacité de régénérescence rapide comme pour le pin d'Alep) (Pausas et Keeley 2021). Malgré cette prédisposition écologique, l'occurrence des incendies dans ces pays présente une forte variabilité spatiale (Ruffault et Mouillot 2017) et temporelle avec plutôt une tendance à la baisse du nombre d'incendies sur les dernières décennies mais une forte variabilité interannuelle avec certaines années qui sont exceptionnellement propices aux incendies, comme l'année 2003 en France (Ganteaume et Jappiot 2013 ; Turco et al. 2013). Il est donc essentiel de

[2] Synthèse sur la vulnérabilité des peuplements forestiers au feu, Rapport final réalisé dans le cadre du projet AFORCE VULNEFEU, https://observatoire.foret.gouv.fr/catalogue/synthese-sur-la-vulnerabilite-des-peuplements-forestiers-au-feu

mieux identifier les facteurs déterminants de ces incendies pour expliquer et anticiper leur distribution spatio-temporelle dans un territoire donné (Oliveira et al. 2012).

1.3. La problématique des grands incendies

Comme de nombreux aléas naturels, l'aléa incendie présente une distribution statistique fortement dissymétrique, ce qui signifie qu'une faible proportion d'incendies (souvent qualifiés d'extrêmes dans la littérature) concentre l'essentiel des surfaces brûlées et des conséquences (Bowman et al. 2017). L'étude de Barbero et al. (2019) a montré que sur la période 2001-2016, les feux de plus de 100 hectares représentent 17,4 % de tous les évènements incendies détectés en France et que leur superficie brûlée moyenne est de 398 hectares. Ces résultats complètent ceux de Ganteaume et Jappiot (2013) qui ont montré que la grande majorité des incendies touchent la région méditerranéenne française (environ 70 % sur la période 1990-2010) et ont une superficie brûlée inférieure à 1 hectare, confirmant le caractère fortement dissymétrique de la distribution statistique de l'aléa incendie. De plus, cette étude a montré que les incendies de plus de 100 hectares surviennent principalement sur la période juillet-août, là où les effets conjoints de la météorologie, de la sécheresse et de l'état de la végétation rendent possible leur propagation sur de vastes étendues.

Alors que la période 1991-2013 n'avait pas connu d'incendie de plus de 6 744 hectares (Ganteaume et Jappiot 2013), plusieurs feux ont récemment dépassé 5000 hectares en France (BDIFF[3]), témoignant de l'émergence d'évènements de très grande ampleur.

Le changement climatique est en partie responsable de l'émergence de ces évènements, comme le montre l'étude d'attribution de Lanet et al. (2024), qui a estimé que les conditions climatiques propices au développement du feu de Landiras (Gironde) en juillet 2022 ont été rendues deux fois plus probables sous l'effet du changement climatique.

1.4. L'aléa incendie comme conjonction de facteurs biophysiques et anthropiques

Au-delà des facteurs climatiques, à l'interface ville — espace naturel, la structure et l'état du combustible végétal sont aussi façonnés par des dynamiques socio-écologiques telles que la déprise agricole, l'exode rural, l'urbanisation croissante, l'évolution des pratiques sylvicoles et la recomposition des activités économiques (Chuvieco et al. 2021 ; Marques et al. 2011 ; Moreira et al. 2020 ; Moreira, Rego, et Ferreira 2001). L'aléa incendie résulte ainsi de la combinaison de facteurs biophysiques et anthropiques, sans qu'aucun d'eux ne puisse, pris séparément, expliquer l'occurrence des feux (Chuvieco et al. 2021 ; Ruffault et Mouillot 2017 ; Turco et al. 2016).

Les incendies peuvent ainsi être considérés comme l'expression de systèmes socio-écologiques complexes, résultant d'interactions non linéaires entre climat, météorologie, végétation, usages des sols et activités humaines (Bowman et al. 2020 ; Moreira et al. 2020 ; Pausas et Keeley 2021). Ces interactions sont particulièrement marquées dans le Sud de l'Europe et en région méditerranéenne française, où le morcellement des massifs forestiers multiplie les interfaces ville — espace naturel (Barbero et al. 2019; Bistinas et al. 2014 ; Carlucci et al. 2019).

Dans ce contexte, le changement climatique agit comme un puissant facteur d'amplification de l'aléa incendie plutôt que comme un facteur explicatif unique des incendies (Bowman et al. 2020). Longtemps considérés comme un phénomène essentiellement naturel, saisonnier et localisé, les incendies deviennent ainsi un aléa majeur en France et des évènements extrêmes peuvent survenir sous l'effet du changement climatique (Iglesias, Balch, et Travis 2022 ; Virgilio et al. 2019). Cette nouvelle donne se traduit par une intensification de l'aléa incendie, historiquement concentré en région méditerranéenne (Ganteaume et Jappiot 2013 ; Moreira et al. 2011) et, dans une moindre mesure, dans certaines régions atlantiques (Aquitaine). Mais elle se traduit aussi par

[3] https://bdiff.agriculture.gouv.fr/

son extension à des territoires jusqu'alors relativement épargnés situés à plus haute altitude et plus au Nord, comme les Alpes, la Bretagne, ou la région Centre-Val de Loire (Dupire, Curt, et Bigot 2017 ; Fargeon et al. 2020).

Comprendre cette nouvelle géographie du risque incendie à l'échelle du territoire français nécessite d'articuler les mécanismes physiques du feu avec les dynamiques écologiques, climatiques et socio-économiques qui déterminent la disponibilité des combustibles, les conditions météorologiques favorables aux incendies et les sources d'allumage, et conditionnent ainsi l'occurrence et le comportement des incendies. Dans cette perspective, ce chapitre propose une synthèse des connaissances scientifiques relatives aux composantes de l'aléa incendie, aux facteurs qui caractérisent les régimes de feu en France et aux spécificités des interfaces ville — espace naturel. Une attention particulière est portée aux causes et mécanismes favorisant le développement de grands incendies, dont les conséquences en matière de gestion de crise, de dommages environnementaux et de risques pour les populations sont particulièrement importantes.

1.5. Présentation du corpus du chapitre

Ce chapitre s'appuie sur un corpus de plus de 150 publications tirées de la littérature scientifique, couvrant une grande diversité de sujets, l'aléa incendie étant par nature très multi-échelle multi-physique et faisant intervenir à la fois des aspects biophysiques, écologiques et sociétaux.

La littérature consacrée à l'aléa incendie de végétation est particulièrement abondante dans les régions soumises à un régime récurrent d'incendies, en particulier les régions méditerranéennes, l'ouest des États-Unis et l'Australie. Ici le choix a été fait de privilégier les références sur la région Euro-Méditerranée, car la réalité géographique est relativement contrastée entre ces régions : en Europe, les zones forestières sont de taille plus réduite et bien plus morcelées par une multitude d'interfaces ville — espace naturel, ce qui donne des spécificités à l'aléa incendie, notamment en ce qui concerne les départs de feu en grande majorité d'origine humaine.

Cette littérature a permis d'établir que l'occurrence et le comportement des incendies résultent d'interactions complexes entre les conditions météorologiques, le climat, la disponibilité et les propriétés des combustibles végétaux, la topographie et les sources d'ignition, majoritairement d'origine humaine. En France, les connaissances sont historiquement concentrées sur le domaine méditerranéen, où se développe la majorité des grands incendies, tandis que les travaux portant sur les autres régions demeurent plus limités, bien que leur nombre augmente depuis les incendies exceptionnels de 2022 en Gironde. La question de la transposition des connaissances sur l'aléa incendie hors de la niche historique méditerranéenne, que ce soit sur les conditions météorologiques, la caractérisation des combustibles et l'évolution liée au changement climatique, reste ouverte.

Cette revue bibliographique présente les principaux déterminants de l'aléa incendie de végétation en France en distinguant les composantes météorologiques, climatiques et liées aux combustibles, tout en mettant en évidence leurs interactions. Elle s'appuie principalement sur les connaissances acquises en contexte méditerranéen, tout en intégrant les résultats plus récents issus d'études menées à l'échelle nationale, qui montrent que l'évolution du climat conduit progressivement à une extension géographique et saisonnière de l'aléa vers des régions jusqu'alors peu concernées par les grands incendies. Cette revue bibliographique cherche ainsi à montrer les points communs de l'aléa incendie entre les différentes régions françaises, mais aussi les différences liées aux spécificités régionales et locales.

2. Les composantes de l'aléa incendie de végétation

L'aléa incendie de végétation ne peut être réduit à un seul facteur ni expliqué par un unique modèle de probabilité, il ne se limite ni à la présence de combustible végétal, ni aux conditions météorologiques propices, ni au

nombre de départs de feu observés. Il résulte au contraire de la combinaison non linéaire de trois grandes composantes, elles aussi statistiques (voir figure 1) :

- l'aléa structurel, lié à la disponibilité de combustible végétal,
- l'aléa d'éclosion, lié à la probabilité de départ de feu,
- l'aléa météorologique qui détermine la sensibilité au feu du combustible (Pausas et Keeley 2021 ; Ruffault et Mouillot 2017).

Pour comprendre les dynamiques d'occurrence et de propagation des incendies, il est donc nécessaire d'analyser conjointement ces trois composantes. En effet, les incendies surviennent lorsque ces facteurs franchissent simultanément des seuils critiques : une source d'allumage est présente, les combustibles sont suffisamment abondants et inflammables, et les conditions hydriques permettent leur ignition. Les conditions météorologiques immédiates (vent, température, humidité relative de l'air) peuvent abaisser ces seuils, facilitant ainsi la propagation de grands incendies, tandis que les précipitations tendent à les relever.

Une fois ces seuils franchis simultanément, la sévérité de l'incendie dépend principalement de la durée de l'épisode météorologique et de l'étendue spatiale des combustibles disponibles, également désignée dans la littérature comme leur continuité ou connectivité (Pausas et Keeley 2021 ; Ruffault et Mouillot 2017).



Figure 2 : Les composantes de l'aléa incendie et la notion de sévérité

2.1. Notion de facteurs limitants

La littérature mobilise généralement la notion de facteurs limitants pour évoquer indirectement celle de seuils. Cette notion précise quels seuils sont les plus difficiles à franchir dans un écosystème donné, et donc quelle composante de l'aléa contrôle plus fortement l'occurrence et la propagation des incendies dans cet écosystème.

Selon les contextes bioclimatiques, le facteur limitant peut être les conditions climatiques de température et de précipitations (*climate-limited systems*), la quantité de combustibles (*fuel-limited systems*), leur inflammabilité

(*flammability-limited systems*), les sources d'allumage (*ignition-limited systems*) ou encore la sécheresse (*drought-limited systems*) (Abatzoglou, Williams, et Barbero 2019 ; Chuvieco et al. 2021; Pausas et Keeley 2021 ; Ruffault et Mouillot 2017).

Les régions méditerranéennes sont généralement caractérisées par une végétation adaptée au feu et une disponibilité importante et constante des combustibles. La sécheresse pendant la saison estivale y constitue alors le principal facteur limitant de l'activité incendie.

À l'inverse, dans les régions moins naturellement inflammables comme les Alpes et le Sud-Ouest de la France, la sécheresse sévère de longue durée est le facteur limitant principal, car, si elle se produit, elle peut augmenter temporairement l'inflammabilité de la végétation et produire du combustible végétal (Barbero et al. 2019; Ganteaume et Jappiot 2013 ; Ruffault et Mouillot 2017).

De plus, l'étude de Pausas et Fernández-Muñoz (2012) montre que dans le bassin méditerranéen occidental (en Espagne par exemple), le combustible n'est plus le facteur limitant, ce sont les sécheresses qui sont devenues déterminantes pour l'occurrence et la propagation des incendies. Ceci souligne que les facteurs limitants peuvent eux-mêmes changer au cours du temps sous l'effet des évolutions climatiques et environnementales.

2.2. Concept de régime de feu

La probabilité d'occurrence et l'ampleur des incendies dépendent de la fréquence à laquelle ces différents seuils sont dépassés simultanément dans un écosystème donné. Celle-ci détermine son régime de feu (*fire regime*), c'est-à-dire l'ensemble des caractéristiques spatio-temporelles qui décrivent l'activité incendie dans un territoire au cours d'une période suffisamment longue pour intégrer la variabilité climatique et écologique : fréquence des feux, saisonnalité, taille, intensité et sévérité (Beltrán-Marcos et al. 2024 ; Chuvieco et al. 2021 ; Hardy 2005 ; Pausas et Keeley 2021). À noter que la sévérité reflète les impacts potentiels du feu sur l'écosystème, mais aussi le niveau de dommages sur les personnes et les biens. La probabilité que certains seuils de dommages ou de sévérité soient franchis constitue, elle aussi, une composante statistique de l'aléa incendie.

Le concept de régime de feu permet de dépasser une approche évènementielle de l'incendie pour considérer le feu comme un processus structurant des socio-écosystèmes (voir figure 3). Dans ce cadre conceptuel, le changement climatique apparaît davantage comme un facteur de transformation progressive des régimes de feu que comme une cause directe des incendies. Il agit simultanément sur plusieurs composantes du système, en particulier sur l'aléa structurel et l'aléa météorologique, et abaisse les seuils conduisant à des incendies de grande ampleur (Abatzoglou et al. 2019; Bowman et al. 2020). En effet, le climat agit à la fois directement sur la fréquence et l'intensité des conditions météorologiques propices aux incendies et indirectement sur la dynamique de la végétation et la disponibilité des combustibles, mobilisant ainsi des processus sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles (Pausas et Keeley 2021 ; Ruffault et Mouillot 2017).

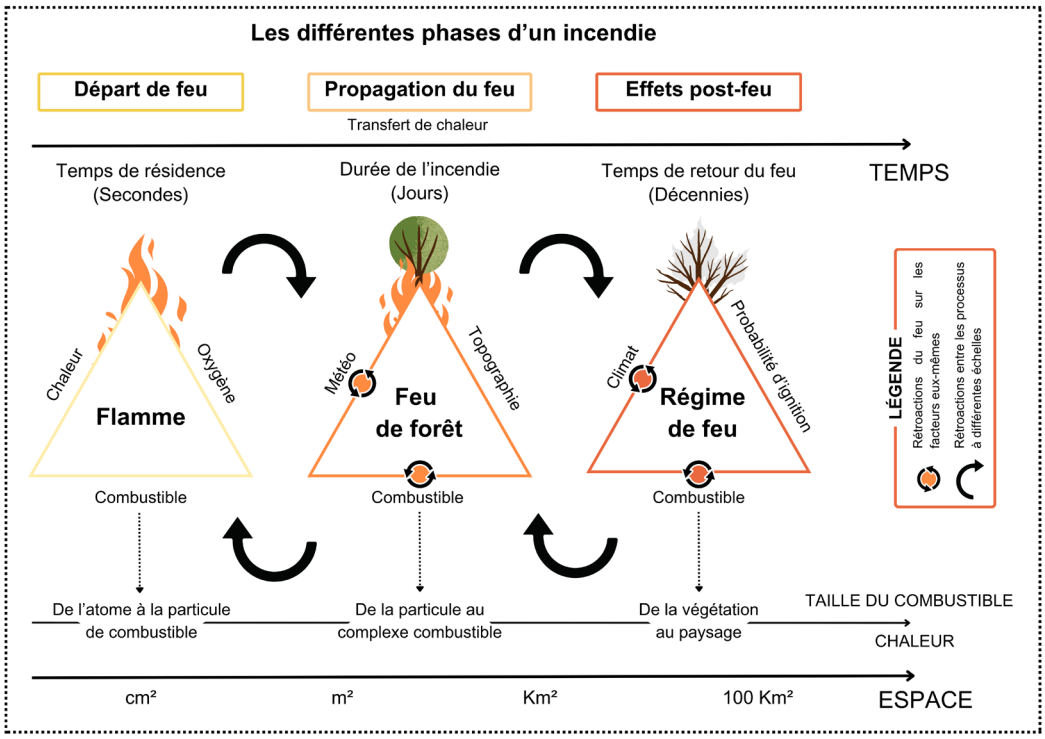


Figure 3 : Schéma faisant le lien entre les différentes échelles des incendies, du départ de feu à sa propagation à l'échelle d'un évènement, jusqu'au régime de feu à l'échelle d'un territoire. Issu du rapport VULNEFEU [4] rédigé par l'Office National des Forêts et l'INRAE (figure produite par C. Revertegat).

Dans ce contexte, les études de détection et d'attribution développées en sciences du climat permettent d'évaluer dans quelle mesure le changement climatique anthropique modifie l'occurrence et l'intensité des conditions météorologiques propices aux incendies (Lanet et al. 2024 ; Zhuang et al. 2021). Elles ne visent pas à attribuer un incendie particulier au changement climatique, mais à quantifier son influence sur les facteurs climatiques et météorologiques qui favorisent son éclosion, sa propagation ou son intensité. L'enjeu est donc de comprendre dans quelle mesure il transforme durablement les régimes de feu en modifiant possiblement la fréquence, la saisonnalité, l'intensité et l'étendue spatiale des conditions favorables aux incendies (voir Chap. 5, Changements globaux).

2.2.1. Rôle des facteurs anthropiques

Toutefois, les facteurs biophysiques (climat, météorologie, végétation, topographie) ne peuvent expliquer à eux seuls l'évolution récente des régimes de feu et leurs disparités régionales. Des facteurs anthropiques entrent également en jeu au niveau de l'aléa d'éclosion (source d'allumage), de la capacité de suppression ou de contrôle des incendies, mais aussi indirectement au niveau de l'aléa structurel et de l'aléa météorologique à travers les transformations des paysages (changements d'occupation des sols) en lien avec les dynamiques socio-économiques (déprise agricole, expansion urbaine, etc.) (Pandey et al. 2023 ; Pausas et Keeley 2021), ou encore l'influence de la lutte sur l'accumulation du combustible (Curt, Fréjaville, et Lahaye 2016) (voir Chap. 1, Interfaces et Chap. 5, Changements globaux)

À l'échelle globale, il reste peu de régimes de feu purement naturels, c'est-à-dire non façonnés par les sociétés humaines, y compris dans des régions rurales reculées d'Amérique du Nord (Parisien et al. 2016). En Europe, les interfaces ville — espace naturel sont particulièrement répandues, occupant 15 % de la surface continentale

[4] Synthèse sur la vulnérabilité des peuplements forestiers au feu, Rapport final réalisé dans le cadre du projet AFORCE VULNEFEU, https://observatoire.foret.gouv.fr/catalogue/synthese-sur-la-vulnerabilite-des-peuplements-forestiers-au-feu

végétalisée (contre 4,7 % à l'échelle globale) (Schug et al. 2023), ce qui renforce l'importance des facteurs anthropiques dans les régimes de feu européens et *a fortiori* français. Ainsi, les incendies en France et en particulier en région méditerranéenne française résultent d'interactions complexes entre facteurs biophysiques et anthropiques (Ruffault et Mouillot 2017).

2.2.2. Échelle d'analyse des régimes de feu et de leur évolution

Dans ce contexte, comprendre les régimes de feu, leurs évolutions et les scénarios plausibles d'incendies dans les différentes régions françaises (voir figure 4) nécessite de prendre en compte une diversité de facteurs et de comprendre lesquels sont prédominants suivant les régions bioclimatiques, les saisons, les échelles spatiales considérées et même selon la taille des incendies étudiés (Barbero et al. 2019; Molina et Galiana-Martín 2016 ; Ruffault et Mouillot 2017 ; Syphard et al. 2018).

La région méditerranéenne française est particulièrement touchée par l'aléa incendie et régulièrement par des grands feux, mais ces derniers se produisent dans d'autres régions françaises, et ce, même en-dehors du cœur de la saison des feux, juillet-août (voir figure 4) (Barbero et al. 2019). Cette variabilité régionale de l'activité incendie nécessite ainsi de mieux comprendre les facteurs en jeu, à la fois globaux et locaux, et d'adopter des approches régionales pour comprendre et anticiper l'évolution de l'aléa incendie dans un contexte de changement climatique.

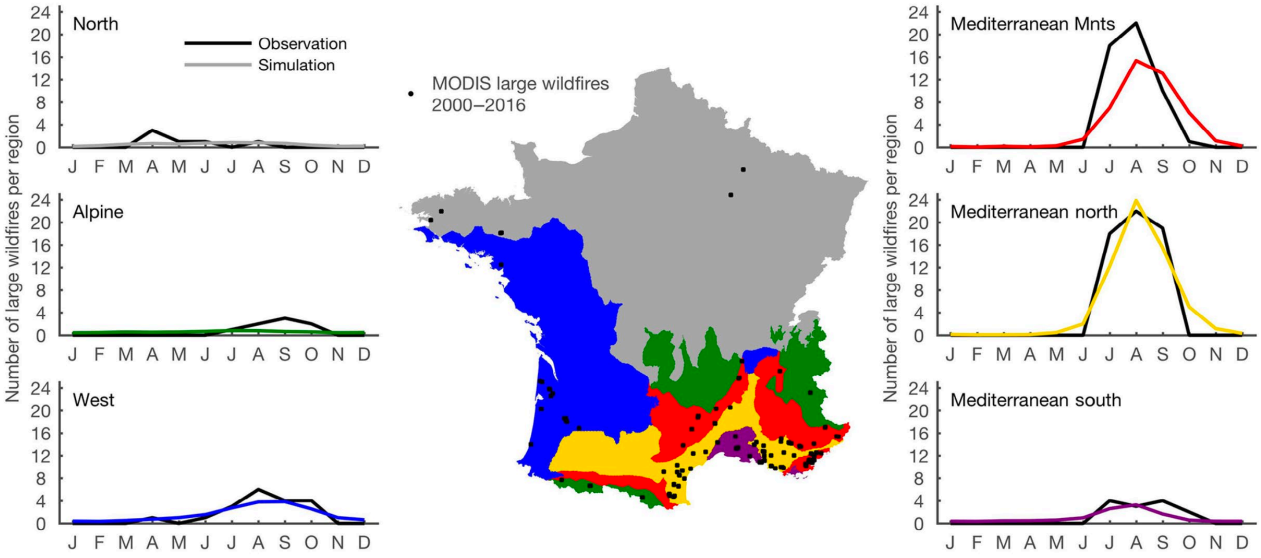


Figure 4 : Caractérisation des régions bioclimatiques françaises affectées par des incendies dans le climat présent. Le nombre de feux de plus de 100 hectares pour chaque mois de l'année (points noirs) a été calculé pour chacune des régions sur la période 2001-2016 à partir des données satellitaires MODIS et de la réanalyse SAFRAN à 8 km de résolution spatiale et à résolution journalière (Barbero et al. 2019).

Cette conception de l'aléa incendie fournit le cadre d'analyse retenu dans la suite de ce chapitre, qui examine successivement les principales composantes de l'aléa (combustibles, conditions météorologiques et sécheresses, allumage et éclosion) avant d'analyser leurs interactions et leur évolution dans un contexte de changement climatique et plus largement de changements globaux (détaillés au Chap. 5, Changements globaux).

2.3. Combustible végétal et l'aléa structurel

Le combustible végétal constitue le déterminant structurel de l'aléa incendie. En son absence, aucune combustion ni propagation du feu ne sont possibles, quelles que soient les conditions météorologiques ou la présence de sources d'allumage.

L'étude du combustible végétal mobilise plusieurs échelles d'analyse, chacune permettant de décrire des processus complémentaires jouant sur l'aléa incendie. À l'échelle des particules solides, les propriétés physiques et chimiques des combustibles gouvernent la pyrolyse, la combustion et les transferts de chaleur. L'organisation de la végétation sous forme de strates verticales (voir figure 5) est également importante pour comprendre ce qui conduit à l'accumulation de combustibles mais aussi ce qui conduit le passage d'un feu de surface à un feu de cime. Enfin, à l'échelle du paysage, la continuité spatiale des combustibles contrôle le potentiel de propagation des incendies.

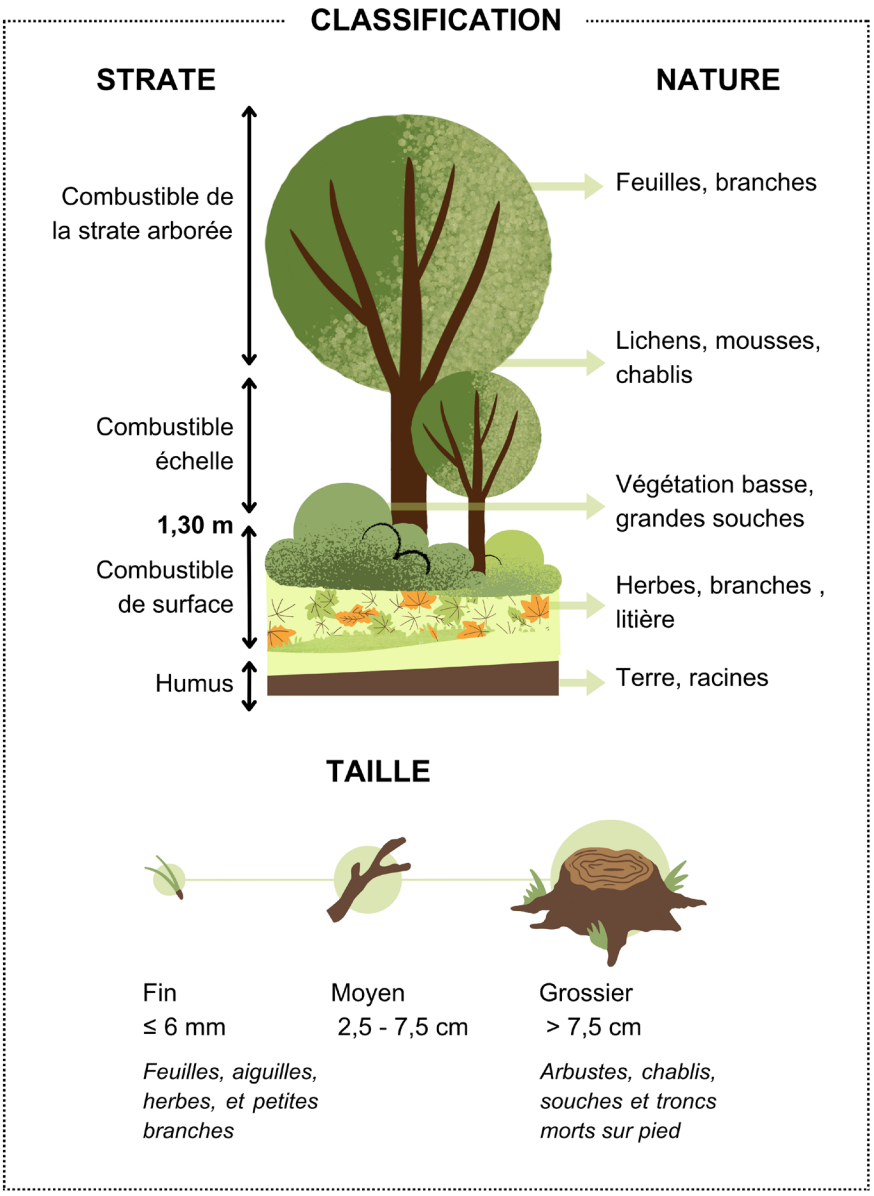


Figure 5 : Schéma de la stratification verticale de la végétation dans les territoires français, incluant principalement la litière, le bois mort au sol et la strate herbacée en surface, la strate arbustive (basse et haute) et la strate arborée (sous-canopée et canopée). Issu du rapport VULNEFEU rédigé par l'Office National des Forêts et l'INRAE (figure produite par C. Revertegat).

2.3.1. Caractéristiques des combustibles morts et vivants

La végétation stocke de l'énergie sous forme de biomasse vivante ou morte. Du point de vue de la physique des incendies, cette biomasse peut être assimilée à un milieu poreux constitué de particules solides séparées par une phase gazeuse (l'air ambiant).

Les propriétés intrinsèques d'inflammabilité de ces particules (voir figure 5) dépendent principalement des caractéristiques suivantes (Aragoneses et al. 2023; Behm et al. 2004 ; Corona et al. 2014 ; Riccardi, Sandberg, et Ottmar 2007) :

- la charge (masse de matière sèche par unité de surface qui est liée à la densité massique des particules et à la porosité de la strate de combustibles, c'est-à-dire la proportion volumique de la strate de combustibles occupée par la phase solide),
- la géométrie (surface réactive par unité de volume),
- le pouvoir calorifique potentiel (énergie libérable par le combustible ; 1 kg de biomasse sèche correspond approximativement à 0,4 l d'essence ; il dépend de la composition en composés carbonés tels que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, ainsi que de la teneur en composés volatils), ou encore
- la teneur en eau.

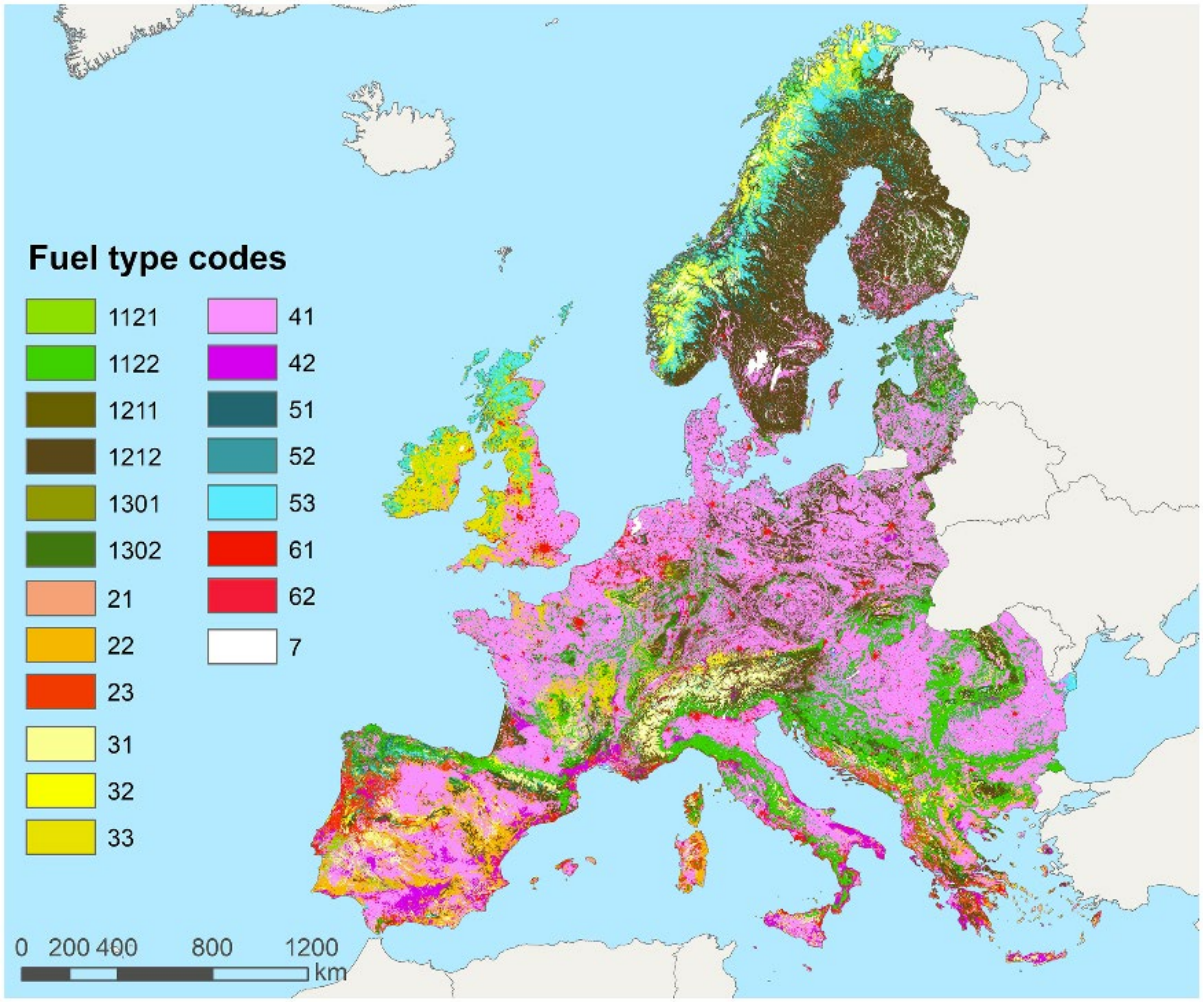
Cette teneur en eau, en particulier celle de la masse foliaire, joue un rôle prépondérant. Elle correspond à la quantité d'eau qui doit être évaporée avant que la combustion puisse débuter. Plus cette teneur est élevée, plus l'énergie nécessaire pour atteindre l'ignition est importante, ce qui réduit l'inflammabilité du combustible (Werth et al. 2016).

De manière conceptuelle, l'inflammabilité peut se décomposer en quatre composantes : i) l'aptitude à l'inflammation ou *ignitability* (i.e. le temps nécessaire à l'allumage d'un matériau une fois que celui-ci est exposé à une source d'inflammation), ii) la durée de la combustion ou *sustainability* (i.e. la durée pendant laquelle un matériau continue de brûler, avec ou sans source de chaleur), iii) la combustibilité ou *combustibility* (i.e. la vitesse et l'intensité avec lesquelles un combustible libère de l'énergie au cours de sa combustion), et iv) la consumabilité ou *consumability* (i.e. la fraction de combustibles effectivement consommée au cours de la combustion) (Behm et al. 2004). Dans la suite, le terme inflammable qui qualifie un combustible donné recouvre ces différentes composantes de manière non différentiée.

Au sein de la biomasse morte, se distinguent les combustibles fins à combustion rapide (quelques millimètres de diamètre) des combustibles plus grossiers à combustion plus lente. Les combustibles fins morts sont, par exemple, les aiguilles, les feuilles mortes, les herbacées sèches ou les broussailles sèches. Ils favorisent l'allumage du feu et les premières phases de propagation en raison de leur capacité à s'enflammer rapidement (Miesel et al. 2002; Riccardi et al. 2007). Ils ont une faible inertie (ou temps de réponse) face aux changements de conditions météorologiques. Ainsi, leur teneur en humidité (DFMC pour *Dead Fuel Moisture Content*) peut évoluer rapidement, à l'échelle horaire, voire journalière, en fonction des variations météorologiques. Elle est, en particulier, étroitement liée à l'humidité relative de l'air (Aguado et al. 2007).

Les combustibles morts de plus grand diamètre et les combustibles vivants (branches épaisses, troncs, végétation verte) sont moins inflammables et présentent une combustion plus lente. Mais, lorsqu'ils sont suffisamment desséchés, ils brûlent plus longtemps et dégagent une grande quantité d'énergie, contribuant à une intensification de l'incendie. Contrairement au DFMC, la teneur en eau du combustible vivant (LFMC pour *Live Fuel Moisture Content*) varie sur des échelles de temps hebdomadaires à mensuelles et quotidiennes. Elle dépend non seulement des conditions météorologiques mais aussi de l'humidité des sols, des processus physiologiques propres de la plante et notamment de son feuillage, et de son stress hydrique. Elle présente ainsi une forte variabilité spatio-temporelle, dépend des espèces végétales et est donc complexe à caractériser (Jolly et Johnson 2018). Dans la littérature, les anomalies de teneur en humidité des sols sont fréquemment utilisées comme un indicateur indirect de l'état hydrique de la végétation et de son niveau de sécheresse (Oliveira et al. 2012). Des travaux récents cherchent à caractériser le LFMC en tirant parti des observations in situ, notamment celles du Réseau Hydrique (Martin-StPaul et al. 2018), et de modèles de surface continentale simulant l'état du sol et de la surface (Santos et al. 2025).

Malgré la grande variété intrinsèque des propriétés des combustibles, des modèles de combustibles définissant les propriétés types des combustibles de surface ont été définis dans la littérature en lien avec les types d'occupation des sols et des couverts végétaux (Aragoneses et al. 2023).



FirEUrisk fuel type		FirEUrisk fuel type	
Code	Description	Code	Description
1111	Open broadleaf evergreen forest	23	High shrubland [≥ 1.5 m)
1112	Closed broadleaf evergreen forest	31	Low grassland [0–0.3 m)
1121	Open broadleaf deciduous forest	32	Medium grassland [0.3–0.7 m)
1122	Closed broadleaf deciduous forest	33	High grassland [≥ 0.7 m)
1211	Open needleleaf evergreen forest	41	Herbaceous cropland
1212	Closed needleleaf evergreen forest	42	Woody cropland
1221	Open needleleaf deciduous forest	51	Wet and peat/semi-peat land – tree
1222	Closed needleleaf deciduous forest	52	Wet and peat/semi-peat land – shrubland
1301	Open mixed forest	53	Wet and peat/semi-peat land – grassland
1302	Closed mixed forest	61	Urban continuous fabric
21	Low shrubland [0–0.5 m)	62	Urban discontinuous fabric
22	Medium shrubland [0.5–1.5 m)	7	Nonfuel

Figure 6 : Cartographie d'un modèle de combustibles à l'échelle de l'Europe à 1 km de résolution issue du projet européen FirEUrisk (Aragoneses et al. 2023). Cette cartographie distingue les types forestiers feuillus, résineux et mixtes (1111 à 1302) des types de végétation basse (garrigue et maquis de 21 à 23, herbacées de 31 à 33, surfaces agricoles de 41 à 42, tourbières de 51 à 53) et des zones urbaines (61-62). Les interfaces ville — espace naturel ne correspondent pas à une classe spécifique.

Ainsi, l'état des combustibles végétaux, et donc leur degré d'inflammabilité et leur vitesse de combustion, dépend principalement de leur taille et de leur teneur en eau. Lorsque les combustibles sont fortement desséchés, moins d'énergie est nécessaire pour initier la pyrolyse puis l'ignition, ce qui favorise l'allumage et accélère la

propagation du feu. Les épisodes de sécheresse prolongée, les vagues de chaleur et les faibles humidités relatives de l'air contribuent à réduire les teneurs en eau des combustibles morts et vivants, tout en favorisant l'accumulation de combustibles morts et en abaissant les seuils d'inflammabilité, ce qui in fine accroît la vitesse de propagation des incendies. Quand ces conditions se combinent, par exemple au cours d'évènements climatiques extrêmes conjoints (Zscheischler et al. 2018), les combustibles vivants jouent un rôle majeur dans le développement de grands feux et favorisent de fortes intensités conduisant à des impacts en cascade (Martins et al. 2025 ; Weise et Wotton 2010 ; Werth et al. 2016).

2.3.2. Structure verticale des combustibles

À l'échelle des strates de végétation, la structure verticale des combustibles contrôle les transitions entre les différents types de feu. Dans la majorité des cas, un incendie éclot sous la forme d'un feu de surface alimenté par les combustibles végétaux fins présents dans la litière, le bois mort et la strate herbacée. Lorsque ces combustibles sont suffisamment continus, l'incendie se propage sous la forme d'un feu de surface (Finney et al. 2021).

La présence de combustibles intermédiaires, souvent désignés sous le terme de *ladder fuels*, combustibles échelles, établit une continuité verticale entre les combustibles de surface et la canopée (voir figure 5). Ces combustibles sont principalement constitués de la strate arbustive, des jeunes arbres et des branches basses de la canopée. Lorsque l'intensité du feu de surface dépasse un seuil critique, cette continuité verticale favorise le passage du feu en cime (*torching*). Cette transition conduit à l'inflammation du houppier. Le feu brûle alors la végétation sur toutes ses strates, des combustibles de surface jusqu'à la canopée (Fernandes, Monteiro-Henriques, et al. 2016 ; Riccardi et al. 2007). Si ce passage en cime se produit sur des arbres isolés, on parle de feu de cime passif. En revanche, si les houppiers sont eux-mêmes suffisamment connectés, le feu peut ensuite se propager de proche en proche dans la canopée et évoluer vers un feu de cime actif qui est alors beaucoup plus intense, se propage beaucoup plus rapidement et a des hauteurs de flammes très supérieures à celles d'un feu de surface.

La transition vers un feu de cime est généralement associée à un incendie très difficile à maîtriser et constitue l'un des phénomènes pouvant conduire à des incendies extrêmes (Tedim et al. 2018 ; Werth et al. 2016). La structure verticale de la végétation constitue ainsi un paramètre-clé du comportement des incendies. C'est un point important, car dans de nombreuses forêts du Sud de l'Europe et notamment en France, il y a eu une densification progressive du sous-bois et une accumulation de combustibles de surface et intermédiaires au cours des dernières décennies. Cette évolution accroît la continuité verticale des combustibles et le risque de feux de cime (Fernandes, Monteiro-Henriques, et al. 2016 ; Moreira et al. 2020 ; Pausas et Keeley 2021).

2.3.3. Continuité des combustibles à l'échelle du paysage

À l'échelle du paysage, la propagation des incendies sur de grandes étendues dépend principalement de la continuité horizontale des combustibles, largement influencée par les dynamiques écologiques et les usages des sols. À l'inverse, les discontinuités naturelles (affleurements rocheux, cours d'eau, zones de sol à nu) ou anthropiques (champs agricoles, vergers, routes, coupures de combustibles) peuvent ralentir, voire interrompre, la propagation du feu (Werth et al. 2016).

Les études menées dans les paysages méditerranéens montrent que la structure du paysage influence fortement la taille des incendies (Viedma, Angeler, et Moreno 2009 ; Viedma, Moreno, et Rieiro 2006).

Les paysages homogènes composés de formations arbustives (garrigue, maquis) ou forestières (comme par exemple le massif des Maures en région méditerranéenne française) présentent une certaine continuité et une charge élevée des combustibles, ce qui favorise des vitesses de propagation élevées et le développement de grands feux (Curt, Borgniet, et Bouillon 2013 ; Fernández-Guisuraga et Calvo 2023 ; Ganteaume et Barbero 2019 ; Perpinyà et Pallarès-Barberà 2006 ; Vega-García et Chuvieco 2006).

À l'inverse, des paysages en mosaïque présentent davantage de discontinuités et sont ainsi susceptibles de limiter la propagation des incendies (Fernandes 2010 ; Fernandes et al. 2014).

Dans la majorité de la littérature, un lien fort entre la taille des incendies et les types d'occupation des sols (« land cover ») est ainsi relevé (Bajocco et Ricotta 2008 ; Fernandes, Monteiro-Henriques, et al. 2016 ; Fréjaville, Curt, et Carcaillet 2016 ; Moreno et al. 2011).

2.3.4. Les processus qui façonnent la structure des combustibles

La structure des combustibles n'est pas une propriété fixe des écosystèmes. Elle résulte d'un équilibre dynamique entre la production de biomasse, son accumulation, sa décomposition et les interventions humaines. Les changements d'usage des sols observés au cours des dernières décennies en lien avec la déprise agricole ou certaines mesures de gestion (reboisement, suppression des feux) ont profondément modifié cet équilibre dans de nombreuses régions, notamment sur le bassin méditerranéen, favorisant l'accumulation de combustibles et augmentant ainsi le potentiel d'incendies intenses (Moreira et al. 2020).

L'abandon progressif des activités agricoles et pastorales a favorisé l'expansion des formations arbustives puis forestières, entraînant une augmentation de la charge en combustibles et de sa continuité horizontale et verticale (Moreira et al. 2001 ; Pausas et Keeley 2021). Cette homogénéisation progressive des paysages est aujourd'hui reconnue comme l'un des principaux facteurs expliquant l'augmentation du potentiel de propagation des incendies dans le Sud de l'Europe, comme par exemple dans le centre du Portugal (Marques et al. 2011 ; Silva et al. 2019).

Les formations arbustives méditerranéennes, comprenant notamment les garrigues et les maquis (*shrublands*), occupent une place particulière dans cette dynamique, alors qu'elles favorisent à la fois le nombre d'incendies et de grandes superficies brûlées. Constituées de combustibles fins particulièrement inflammables, elles présentent des vitesses de propagation élevées et sont associées à des temps de retour des incendies relativement courts, ce qui laisse suggérer un risque de « garriguisation », c'est-à-dire un risque que la garrigue remplace progressivement les zones forestières (Curt et al. 2013 ; Miesel et al. 2002 ; Oliveira et al. 2012). De plus, les garrigues sont sujettes à un fort taux d'allumage et elles sont historiquement jugées moins prioritaires vis-à-vis de la lutte incendie. Leur expansion à la suite de la déprise agricole est ainsi reconnue comme une des causes de la forte activité incendie observée dans plusieurs régions méditerranéennes (Curt et al. 2013 ; Ganteaume et Jappiot 2013 ; Moreira et al. 2001 ; Moreno et al. 2011 ; Ruffault et Mouillot 2017).

Il est important de noter que dans les régions atlantiques (en Espagne notamment), la végétation basse est également associée à une plus grande fréquence des feux et à une augmentation de leur sévérité (Beltrán-Marcos et al. 2024).

Les politiques de reboisement ont également contribué à modifier la structure des combustibles, en particulier lorsqu'elles ont conduit au développement de peuplements monospécifiques de conifères (pins d'Alep, pins maritimes) ou d'eucalyptus (Bajocco et Ricotta 2008 ; Marques et al. 2011 ; Moreno et al. 2011 ; Pausas et Keeley 2021 ; Viedma et al. 2009). Ces formations présentent souvent une inflammabilité élevée, notamment au niveau de leur sous-bois et de leur litière, en raison de la composition chimique de leurs tissus (elles sont plus riches en composés très inflammables, tels que les terpènes), de leur faible teneur en eau au niveau des aiguilles et de leur charge en combustibles importante (Behm et al. 2004).

À l'inverse, de nombreuses essences feuillues présentent une inflammabilité plus faible grâce à une teneur en eau plus importante, une composition plus riche en phénols, un bois généralement plus dense et des caractéristiques foliaires limitant la combustion et la propagation du feu (Cappelluti, Elia, et Sanesi 2024 ; Fréjaville et al. 2016 ; Marques et al. 2011).

Les plantations de conifères ou d'eucalyptus favorisent la propagation du feu mais aussi la formation et le transport de brandons (particules incandescentes en suspension dans l'air) qui peuvent conduire à des sautes de feu, c'est-à-dire à l'éclosion de nouveaux foyers d'incendie (Bartlett 2012 ; Finney et al. 2021 ; Wadhwani et al. 2022 ; Wang 2011). Les sautes de feu massives sont identifiées comme un des phénomènes moteurs des évènements extrêmes d'incendie (Tedim et al. 2018 ; Werth et al. 2016). Elles peuvent conduire à des départs de feu dans les interfaces ville — espace naturel et même aider à la pénétration du feu dans les zones urbaines, et ainsi induire des destructions d'habitations ou d'infrastructures (Bartlett 2012).

Les politiques de suppression systématique des incendies sont un élément-clé de la gestion de crise en France. Alors qu'elles permettent d'éteindre rapidement un grand nombre de feux et de limiter la superficie brûlée associée, elles favorisent, sur le long terme, une accumulation des combustibles, notamment dans les sous-bois. Cette accumulation accroît la vulnérabilité de l'écosystème aux sécheresses et aux incendies (Silva et al. 2019), mais aussi la connectivité verticale entre les combustibles de surface et la canopée, augmentant ainsi la probabilité de passage en cime lorsque les conditions météorologiques deviennent propices (Moreira et al. 2020 ; Pausas et Keeley 2021).

Ainsi, le combustible végétal par ses propriétés, sa structure verticale et sa répartition spatiale, constitue le support structurel de l'aléa incendie. Son influence ne peut être comprise indépendamment des processus écologiques et des dynamiques socio-économiques qui façonnent les paysages. Ses caractéristiques déterminent le potentiel de propagation des incendies, alors que l'aléa météorologique et l'aléa d'éclosion contrôlent la probabilité que ce potentiel se réalise. Cette interaction entre combustibles et conditions atmosphériques est examinée dans la suite.

2.4. L'aléa météorologique et les sécheresses

Les conditions météorologiques, qu'il s'agisse du vent, de la température, de l'humidité relative de l'air ou des précipitations, constituent l'une des composantes les plus dynamiques de l'aléa incendie de végétation.

Ces conditions jouent un rôle conjoncturel majeur dans les évènements incendies (Lahaye et al. 2018 ; Ruffault, Moron, et al. 2017). Contrairement aux caractéristiques des combustibles, qui évoluent généralement sur des échelles de temps longues, les conditions météorologiques peuvent modifier en quelques heures seulement le potentiel de propagation et l'intensité d'un incendie, en particulier dans le Sud de l'Europe où la végétation est particulièrement inflammable. Elles agissent directement sur les processus physiques de combustion et de propagation du feu (voir figure 1), mais elles modulent également l'état hydrique des combustibles (notamment celui des combustibles morts), dont dépend largement leur inflammabilité (Oliveira et al. 2012 ; Urbieta et al. 2015 ; Xystrakis et al. 2013).

Au-delà de son rôle conjoncturel, la météorologie agit sur l'aléa incendie selon plusieurs échelles temporelles. Alors qu'à l'échelle de l'évènement, elle détermine le potentiel de propagation du feu, ce sont les épisodes de sécheresse qui modifient progressivement l'état hydrique des combustibles et le partitionnement entre combustibles morts et combustibles vivants à l'échelle de plusieurs semaines ou plusieurs mois (Ruffault et al. 2018). À plus long terme, sur des échelles saisonnières à pluriannuelles, l'enchaînement de conditions météorologiques (lié à la variabilité climatique) conditionne la croissance de la végétation, la disponibilité des combustibles et leur dessèchement progressif (Pausas et Keeley 2021).

Cette articulation entre processus météorologiques immédiats et processus climatiques explique que l'activité incendie dans les écosystèmes méditerranéens et tempérés soit davantage corrélée à un certain enchaînement de conditions météorologiques plutôt qu'à une variable météorologique unique (Ganteaume et Jappiot 2013 ; Urbieta et al. 2015). Le régime de feu propre à un territoire est donc défini par le lien étroit entre climat et fonctionnement des écosystèmes (Barbero et al. 2019 ; Pausas et Keeley 2021).

2.4.1. Le vent comme principal moteur de propagation des incendies

Parmi les variables météorologiques, le vent constitue le principal facteur contrôlant la propagation des grands incendies en France (on entend par grands incendies ici les feux de plus de 100 hectares), à l'exception de la Corse, où la température joue un rôle plus important encore (Lahaye et al. 2018 ; Ruffault, Moron, et al. 2017).

L'influence du vent dépasse largement le simple apport d'oxygène à la combustion. En inclinant les flammes vers les combustibles encore non brûlés, le vent accroît les transferts de chaleur par convection et accélère le préchauffage des combustibles jusqu'à atteindre l'ignition (voir figure 1). Le vent favorise également le transport de brandons (i.e. particules solides incandescentes, dénommées *firebrand* dans la littérature) susceptibles d'engendrer des sautes de feu (« spotting »), parfois à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres, du

front de feu principal (Finney et al. 2021). Les sautes de feu sont ainsi un processus favorisant les franchissements des coupures de combustibles (e.g. discontinuités des combustibles, routes, cours d'eau), et pouvant faire éclore des incendies au sein de zones urbanisées (Tedim et al. 2018). Elles sont ainsi un phénomène particulièrement critique au niveau des interfaces ville — espace naturel.

L'effet du vent ne se limite pas à moduler la vitesse de propagation, il conditionne aussi la forme du front de feu (lorsque les vents sont soutenus, la propagation devient fortement anisotrope, concentrée dans la direction du vent dominant) et donc les zones géographiques touchées par un incendie. De manière plus générale, il conditionne la dynamique globale de l'incendie. En effet, des épisodes venteux prolongés permettent au feu de conserver une vitesse élevée pendant plusieurs heures ou plusieurs jours. La superficie finale brûlée d'un incendie est ainsi étroitement liée à la durée des conditions météorologiques favorables à la propagation (Pausas et Keeley 2021).

En région méditerranéenne française, les grands incendies relèvent majoritairement de régimes de feu pilotés par le vent (*wind-driven fire*). En analysant les archives de quarante années (1973-2013) d'incendies méditerranéens via la banque de données PROMETHEE, Ruffault et al. (2017) montrent que les évènements de plus de 120 hectares surviennent principalement lors de situations synoptiques particulières. Il s'agit du régime de temps de dorsale océanique (*Atlantic Ridge*), favorisant l'établissement de vents continentaux forts (par exemple les vents régionaux de type mistral et tramontane), chauds et secs sur le sud-est de la France. Leur occurrence a ainsi des implications directes sur le niveau de danger incendie.

Cette prépondérance du vent explique que de nombreux grands incendies méditerranéens restent principalement limités par les conditions atmosphériques plutôt que par la quantité de combustibles disponibles, la végétation méditerranéenne étant intrinsèquement inflammable. Lorsque les combustibles sont déjà suffisamment secs, l'intensité des vents devient le facteur critique modulant la vitesse de propagation et la taille finale de l'incendie (Lahaye et al. 2018).

2.4.2. Le rôle conjoint de la température et de l'humidité de l'air

La température de l'air et son humidité relative constituent les principaux facteurs contrôlant les échanges d'eau entre la végétation et l'atmosphère. Des températures élevées associées à une faible humidité relative augmentent l'évapotranspiration et accélèrent l'assèchement des combustibles. Cette diminution de leur teneur en eau réduit l'énergie nécessaire à leur ignition et accroît leur inflammabilité (Pausas et Keeley 2021).

Les combustibles morts fins réagissent particulièrement rapidement aux variations des conditions atmosphériques. Leur teneur en eau peut évoluer en quelques heures seulement en fonction de la température et de l'humidité relative, contribuant ainsi à des variations journalières du danger incendie. Les combustibles vivants présentent une inertie beaucoup plus importante, mais des épisodes prolongés de chaleur et de faible humidité peuvent également provoquer une diminution significative de leur teneur en eau, augmentant leur contribution à la propagation des incendies.

Lorsque ces conditions chaudes et sèches persistent plusieurs jours sur des zones géographiques occupées par des peuplements présentant d'importantes charges en combustibles, un incendie peut adopter un comportement particulièrement sévère et présenter de très fortes intensités. Les flux de chaleur libérés par les flammes génèrent alors des colonnes convectives particulièrement puissantes, susceptibles de modifier localement la dynamique atmosphérique et d'avoir une rétroaction sur l'incendie. Le feu provoque ainsi des modifications du vent en surface (on parle de vent induit par le feu), qui impactent elles-mêmes la propagation de l'incendie. Ces incendies dominés par leur panache convectif (*plume-dominated fires*) peuvent évoluer vers des phénomènes de pyroconvection : la propagation ne s'effectue plus seulement dans la direction du vent dominant, mais elle est également substantielle sur les flancs de l'incendie sous l'effet des fluctuations marquées du vent en surface en cas de pyroconvection profonde.

Ces phénomènes de pyroconvection profonde sont ainsi associés à des vitesses de propagation et des surfaces brûlées très importantes (Lahaye et al. 2018), mais aussi à un caractère erratique et difficilement prévisible des incendies, complexifiant la lutte (Pausas et Keeley 2021 ; Tedim et al. 2018).

Alors que ce type d'incendie demeurait encore relativement rare en France, il pourrait devenir plus fréquent sous l'effet du changement climatique, en raison de l'augmentation attendue de la fréquence et de l'intensité des épisodes de fortes chaleurs (Ruffault, Moron, et al. 2017).

Un autre impact de la température concerne l'affaiblissement du rôle protecteur de la nuit sous l'effet du changement climatique (Balch et al. 2022). En moyenne, les nuits pendant la saison des feux deviennent plus chaudes et parfois plus sèches, ce qui réduit les périodes de reprise d'humidité des combustibles et peut prolonger les phases de comportement actif des incendies. Historiquement, les périodes nocturnes étaient généralement associées à une diminution de l'intensité du feu et constituaient des fenêtres stratégiques pour les opérations de lutte. L'augmentation des températures nocturnes réduit ainsi cette marge opérationnelle et complique la gestion de crise.

2.4.3. Les précipitations et les effets de leur temporalité

Contrairement au vent ou à la température, les précipitations exercent une influence plus complexe sur l'aléa incendie. Leurs effets dépendent fortement de leur temporalité.

Pendant la saison des feux, les précipitations augmentent la teneur en eau des combustibles et réduisent simultanément la probabilité d'allumage ainsi que le potentiel de propagation des incendies (Oliveira et al. 2012). Elles constituent ainsi l'un des principaux facteurs expliquant les variations à court terme du danger incendie.

Les précipitations intervenant plusieurs mois avant la saison estivale peuvent avoir un effet opposé. En stimulant la croissance de la végétation, notamment des strates herbacées et arbustives (voir figure 5), elles favorisent l'accumulation de combustibles fins qui, une fois desséchés durant l'été, deviennent particulièrement propices à l'ignition et à la propagation des incendies. Dans les écosystèmes méditerranéens, des printemps exceptionnellement humides peuvent ainsi être suivis de saisons de feux particulièrement sévères (caractérisées par de grandes superficies brûlées) lorsque cette biomasse nouvellement produite (notamment dans les maquis et garrigues) est ensuite soumise à une sécheresse estivale (Marcos-Matamoros et al. 2015 ; Oliveira et al. 2012 ; Pausas et Keeley 2021 ; Xystrakis et al. 2013).

Les précipitations ont ainsi une influence duale sur l'aléa incendie. Alors qu'elles réduisent le danger incendie à court terme, elles peuvent l'accroître plusieurs mois plus tard par leur effet sur la production de biomasse. La séquence des précipitations au cours d'une année est ainsi plus déterminante sur l'aléa incendie que la quantité annuelle de précipitations prise de manière isolée (Xystrakis et al. 2013).

2.4.4. Les sécheresses, un facteur intégrateur entre météorologie, combustibles et incendies

Si chacune des variables météorologiques contribue à moduler le comportement des incendies à court terme, les sécheresses constituent le principal mécanisme reliant les conditions atmosphériques à l'évolution de l'état des combustibles. Elles résultent d'un déséquilibre prolongé entre les apports en eau, principalement les précipitations, et les pertes par évapotranspiration, conduisant à un déficit hydrique progressif des sols puis de la végétation. Contrairement aux épisodes de vent ou de chaleur, dont les effets principaux se manifestent à l'échelle de quelques heures ou quelques jours, les sécheresses s'installent sur des périodes de plusieurs semaines, plusieurs mois, voire plusieurs saisons. Elles conditionnent ainsi durablement l'inflammabilité des combustibles et déterminent en grande partie la sévérité des saisons de feux.

Le rôle des sécheresses s'explique par leur action sur la teneur en eau des combustibles, variable essentielle de leur inflammabilité. Alors que les combustibles morts fins réagissent rapidement aux conditions atmosphériques, les combustibles vivants, en revanche, possèdent une inertie hydrique beaucoup plus importante. Leur dessèchement résulte d'un déficit prolongé en eau disponible dans les sols, qui entraîne progressivement une fermeture des stomates, une diminution de la photosynthèse, une baisse de leur teneur en eau et, dans les situations les plus sévères, des phénomènes d'embolie hydraulique pouvant conduire à la mortalité des arbres. Les sécheresses affectent ainsi simultanément les combustibles morts et vivants, augmentant non seulement leur

probabilité d'inflammation mais également leur capacité à alimenter des incendies de forte intensité (Ruffault et al. 2018; Turco et al. 2017).

Les conséquences des sécheresses dépassent, toutefois, la seule diminution de la teneur en eau des combustibles. Lorsque le déficit hydrique persiste durablement, sur plusieurs mois ou saisons, il modifie la structure même des combustibles. Le ralentissement de la croissance, la mortalité des arbres et l'accumulation de biomasse morte augmentent la charge en combustibles disponibles, tandis que l'allongement de la période durant laquelle l'inflammabilité de la végétation reste élevée conduit à une extension de la saison des feux (Goss et al. 2020; Pausas et Keeley 2021), de juin à septembre au lieu d'être concentrée sur juillet-août (Barbero et al. 2019). Les sécheresses constituent ainsi un facteur à la fois météorologique et structurel de l'aléa incendie (Ruffault et al. 2018; Turco et al. 2017).

Cette influence varie toutefois fortement selon la durée des sécheresses et leur combinaison avec les autres conditions météorologiques. Des travaux récents distinguent notamment deux grands types de sécheresses particulièrement favorables aux incendies qui diffèrent par leurs mécanismes et leurs effets sur les incendies (Ruffault et al. 2018).

Les sécheresses persistantes (*press droughts*) résultent d'un déficit hydrique installé plusieurs mois, associé à de faibles précipitations et une évapotranspiration élevée. Elles provoquent un assèchement progressif des sols puis de l'ensemble des strates de la végétation. Dans ces conditions, les combustibles présentent une faible teneur en eau dès le début de la saison estivale, si bien que des épisodes de vent fort peuvent induire des incendies de grande ampleur (voir figure 7). Les grands incendies observés en région méditerranéenne française au cours de l'été 2016 illustrent ce mécanisme : malgré des conditions synoptiques comparables à celles rencontrées lors d'autres saisons de feux, le déficit hydrique exceptionnel accumulé durant les mois précédents a conduit à une propagation particulièrement rapide et à des superficies brûlées importantes (Ruffault et al. 2018).

Les sécheresses chaudes (*hot droughts*) correspondent à la combinaison d'un déficit hydrique prolongé avec des épisodes de chaleur exceptionnelle. Les températures très élevées accentuent fortement l'évapotranspiration et accélèrent le dessèchement de l'ensemble des combustibles, y compris les combustibles vivants généralement moins sensibles aux fluctuations météorologiques de courte durée. Ces situations favorisent le développement d'incendies particulièrement intenses, dont le comportement peut être dominé par les effets convectifs de panache produits par le feu lui-même (voir figure 7). L'été 2003 constitue l'exemple emblématique de ce type de situation en France. La combinaison d'une sécheresse exceptionnelle et d'une canicule historique a favorisé le développement d'incendies dont plusieurs présentaient des comportements atypiques pour la France, dominés par les effets de panache plutôt que par les seuls effets du vent (Ruffault et al. 2018 ; Ruffault, Moron, et al. 2017).

Dans l'ensemble, ces éléments soulignent l'importance d'analyser les sécheresses, non seulement comme un déficit de précipitations, mais comme un phénomène hydrométéorologique affectant durablement l'état des combustibles à l'origine des saisons de feux les plus sévères (Fernández-Guisuraga et Calvo 2023 ; Ruffault, Curt, et al. 2017 ; Turco et al. 2017). Ces saisons hors norme témoignent d'une extension hors de la niche historique des conditions favorables aux incendies sous l'effet du changement climatique en France (Lahaye et al. 2018; Pausas et Keeley 2021 ; Ruffault et al. 2018).

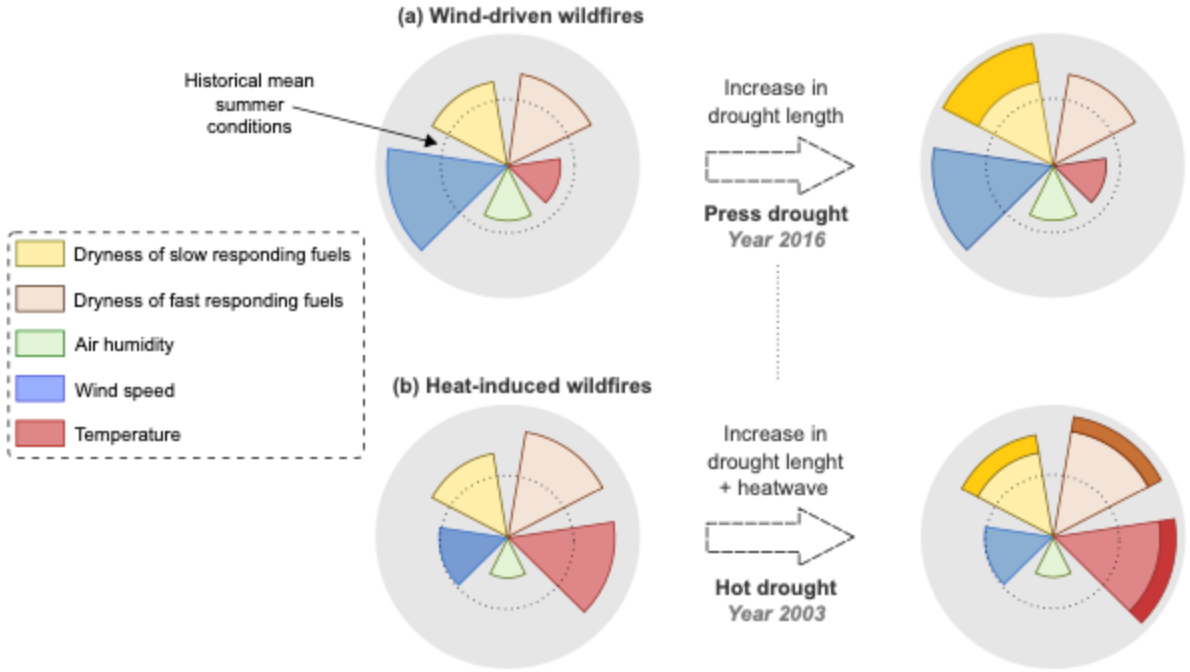


Figure 7 : Analyse des facteurs météorologiques en jeu en fonction du type d'incendie, que ce soit les feux pilotés par le vent (*wind-driven*) ou les feux dominés par les effets de panache convectif (*plume-dominated*). Cette analyse montre la prédominance du vent et celle de la température, respectivement, à travers les exemples des saisons exceptionnelles du point de vue de l'activité incendie en 2003 et en 2016 (Ruffault et al. 2018).

La relation entre sécheresse et activité incendie présente également une forte variabilité spatiale à l'échelle de la France (Barbero et al. 2019).

En région méditerranéenne, où la végétation est naturellement adaptée à des étés secs et où les combustibles demeurent abondants et inflammables une grande partie de l'année, les sécheresses automnales, hivernales et printanières jouent un rôle déterminant dans le préconditionnement des combustibles avant la saison estivale (Pausas et Keeley 2021). Ganteaume et Jappiot (2013) montrent notamment que le nombre de grands incendies est fortement corrélé aux déficits hydriques accumulés avant l'été, tandis que la superficie brûlée est principalement expliquée par la sévérité de la sécheresse estivale. Cette dernière est un facteur explicatif important de l'occurrence de grands incendies supérieurs à 100 hectares. Ainsi, en région méditerranéenne, la disponibilité en combustibles n'est généralement pas limitante. Ce sont principalement leur état hydrique et les conditions météorologiques de propagation qui contrôlent l'activité incendie et qui expliquent l'occurrence de grands feux.

Hors de cette région, dans les régions tempérées du sud-ouest de la France, des Alpes ou plus largement du nord du pays, les écosystèmes demeurent généralement nettement moins inflammables. Les incendies de grande ampleur n'y deviennent possibles que lorsque des sécheresses prolongées conduisent à un dessèchement exceptionnel de la végétation. Les sécheresses jouent alors un rôle de déclencheur, en faisant temporairement basculer des écosystèmes habituellement peu propices aux incendies vers des conditions favorables à leur développement (Barbero et al. 2019). La fréquence plus grande de ces sécheresses prolongées explique en grande partie l'extension récente des zones géographiques touchées par les incendies au-delà du bassin méditerranéen.

2.4.5. Les situations météorologiques propices aux comportements extrêmes des incendies

Les situations les plus critiques ne résultent généralement pas d'une seule variable météorologique extrême, mais de la combinaison de plusieurs facteurs agissant simultanément sur l'état des combustibles et sur les conditions de propagation. Les saisons d'incendies les plus sévères sont ainsi caractérisées par une succession de

déficits hydriques prolongés, puis de températures élevées, d'une faible humidité atmosphérique et d'épisodes de vents forts pendant la saison estivale (Lahaye et al. 2018 ; Ruffault et al. 2018 ; Ruffault, Moron, et al. 2017). Ces événements conjoints (Zscheischler et al. 2018) conduisent à des conditions particulièrement favorables au développement d'incendies rapides, intenses et difficilement contrôlables, voire à des comportements extrêmes.

À l'échelle synoptique, les situations atmosphériques propices aux grands incendies diffèrent selon les régions. En Corse, les grands incendies sont davantage associés à des situations de blocage atmosphérique (« Blocking ») favorisant des épisodes de températures exceptionnellement élevées et des masses d'air exceptionnellement sèches (Ruffault, Moron, et al. 2017). Ces configurations illustrent l'importance des mécanismes de circulation atmosphérique à grande échelle dans la caractérisation de l'aléa incendie, mais aussi de leur nécessaire combinaison avec des épisodes de sécheresses pour intensifier le niveau de danger incendie (Koutsias et al. 2012).

Il est connu que les évènements extrêmes climatiques conjoints (notamment la combinaison de vagues de chaleur et de sécheresses) deviennent plus probables et plus intenses sous l'effet du changement climatique anthropique (Abatzoglou et al. 2019 ; Zscheischler et al. 2018).

Se pose ainsi la question dans la littérature d'un possible changement de régime de feu sous l'effet du changement climatique, avec la possible plus forte occurrence de feux dominés par les effets de panache dans le futur mais cela reste une question scientifique ouverte (Pausas et Keeley 2021 ; Purificação et al. 2024 ; Ruffault, Moron, et al. 2017). Au vu de ces éléments, il y a donc un enjeu certain à étudier la relation feu-météorologie à l'échelle des régions françaises mais aussi son évolution sous l'effet du changement climatique (Ruffault et al. 2018) (Voir chap. 5, changements globaux).

2.5. L'aléa d'éclosion et les spécificités des interfaces

À l'échelle mondiale, la foudre reste la principale source naturelle d'éclosion des incendies de végétation. En Europe occidentale, et plus particulièrement en France, près de 90 % des départs de feu sont d'origine humaine et résultent de négligences (mégots, brûlages dirigés, activités de loisirs, feux d'artifice), d'accidents (défaillances de réseaux électriques et ferroviaires, travaux agricoles ou forestiers) mais aussi de manière non négligeable de malveillance (European Commission 2013 ; Ganteaume et al. 2021 ; Ganteaume et Jappiot 2013 ; González-Olabarría et al. 2012). Ces actes volontaires (pyromanie, vandalisme, conflits avec chasseurs/bergers) sont souvent sous-jacents aux grands incendies sur le bassin méditerranéen, puisqu'ils sont à l'origine de plus de 40 % des feux de plus de 100 hectares observés entre 1997 et 2010 (Ganteaume et Jappiot 2013).

2.5.1. Les causes de départs de feu

Cette prédominance des causes humaines dans les départs de feu confère à l'aléa d'éclosion une dimension profondément socio-territoriale (Ganteaume et al. 2021 ; Lampin-Maillet et al. 2011 ; Oliveira et al. 2012), ce qui est une différence notable avec les autres composantes de l'aléa incendie. Il convient toutefois de distinguer l'éclosion, qui renvoie à l'apparition effective d'un départ de feu, de l'ignition, qui désigne le processus physico-chimique d'allumage résultant de la combinaison d'une source d'allumage, d'un combustible suffisamment sec et inflammable et de conditions météorologiques favorables. La probabilité territoriale d'éclosion doit ainsi être distinguée de l'inflammabilité du combustible disponible localement.

Les causes de départs de feu varient selon les territoires (Rodrígues, Fernández, et Fotheringham 2014), mais les études menées à l'échelle de toute la région Euro-Méditerranée, où les incendies sont très majoritairement d'origine humaine, mettent en évidence un ensemble récurrent de déterminants biophysiques et anthropiques (Leone et al. 2009).

Parmi ces déterminants figurent les conditions météorologiques, la nature et la couverture des combustibles, la densité de population, le réseau de transports, ainsi que l'organisation spatiale des interfaces ville — espace

naturel (Catry et al. 2009 ; Gelabert et al. 2025 ; Jiménez-Ruano et al. 2023 ; Oliveira et al. 2012 ; Perpinyà et Pallarès-Barberà 2006 ; Perpinyà, Serra, et Modugno 2011 ; Syphard et al. 2009).

Les causes humaines des départs de feu ne constituent pas une catégorie homogène, mais correspondent à des mécanismes, des usages et des configurations territoriales distincts. Pour la France, à partir des incendies dont la cause est considérée comme « certaine » ou « très probable » dans la base Prométhée sur la période 1973—2013, Curt et al. (2016) distingue les incendies intentionnels, les accidents liés aux infrastructures, les négligences professionnelles et les négligences des particuliers. Les négligences constituent environ 60 % des départs, mais seulement 30 % de la superficie brûlée : celles des particuliers produisent préférentiellement de très petits feux, inférieurs à 1 ha, tandis que les négligences professionnelles sont davantage associées à des incendies petits ou moyens et se concentrent principalement de l'automne au printemps. À l'inverse, les incendies intentionnels ne représentent qu'environ 20 % des départs, mais près de 40 % de la superficie brûlée, et sont surreprésentés parmi les feux de plus de 10 ha, notamment ceux dépassant 200 ha. Les départs accidentels représentent environ 12 % des incendies et 19 % de la superficie brûlée ; ils sont eux aussi associés aux feux de plus de 200 ha et se concentrent notamment à proximité des routes, voies ferrées, lignes électriques, décharges et autres infrastructures. Au total, les causes humaines représentent 94 % de la superficie brûlée dans l'échantillon analysé, contre environ 6 % pour la foudre. L'étude met ainsi en évidence une géographie et une saisonnalité propres à chaque cause : les incendies intentionnels et accidentels sont plus fréquents en été, tandis que les négligences prédominent de l'automne au printemps ; les départs humains surviennent majoritairement entre 13 h et 17 h. Ces résultats montrent que les politiques de prévention doivent être différenciées selon les pratiques, les territoires, les saisons et le potentiel propre à chaque cause de produire de grands incendies. Ils doivent toutefois être interprétés avec prudence, l'analyse étant limitée au Sud-Est de la France, à une période relativement ancienne et aux seuls 25,3 % des incendies pour lesquels la cause a été jugée suffisamment certaine.

Sandra Oliveira et al. (2012) a analysé 37 prédicteurs regroupant des facteurs biophysiques (topographie, occupation des sols, précipitations avant et au cours de la saison des feux, humidité des sols, température maximale, humidité relative de l'air), socio-économiques (densité et type de routes, distance à la route, densité des voies ferrées, densité des lignes électriques, densité du cheptel, taux de chômage) et démographiques (densité de population, degré d'urbanisation de dense à diffuse). Les résultats montrent que les facteurs climatiques, en particulier les précipitations précédant et pendant la saison des feux, constituent les facteurs les plus déterminants de l'occurrence des incendies.

Les variables anthropiques telles que la densité de cheptel (considéré comme un proxy de l'intensité des activités agricoles), une urbanisation diffuse, le taux de chômage ou encore la distance aux routes secondaires jouent aussi un rôle important (Catry et al. 2009). L'influence des routes sur les départs de feu dépend toutefois de l'occupation du sol et apparaît particulièrement forte dans les milieux où les possibilités d'accès sont plus limitées (Ricotta et al. 2018).

L'étude de Sandra Oliveira et al. (2012) confirme l'importance des interactions entre climat, végétation et activités humaines (voir section 3.3). Elle met aussi en lumière le rôle des infrastructures (routes, rails, lignes électriques) comme sources potentielles d'allumage.

Le rôle conjoint des facteurs biophysiques et anthropiques est confirmé par plusieurs travaux (Bistinas et al. 2014 ; Fernandes, Barros, et al. 2016 ; Ruffault et Mouillot 2017). Les variables utilisées diffèrent selon les études, mais les conclusions convergent dans l'ensemble. Par exemple, dans l'étude de Ruffault et Mouillot (2017), le facteur climatique est pris en compte à travers la longueur de la saison météorologique propice aux feux définie comme le nombre moyen annuel de jours présentant des conditions propices au feu. Concernant la pression anthropique, la proportion d'interfaces ville — espace est directement incluse comme prédicteur en tirant parti des données accessibles via la BD TOPO (Lampin-Maillet et al. 2011).

2.5.2. Le rôle des infrastructures et de la pression anthropique

Les réseaux de transport (routiers, ferroviaires) et électriques constituent des facteurs majeurs de l'aléa d'éclosion, non seulement parce qu'elles peuvent être directement à l'origine d'allumages mais également parce qu'elles structurent les interactions entre activités humaines et espaces végétalisés. Les réseaux routiers, ferroviaires et électriques traversent les territoires, facilitent l'accès aux milieux naturels et concentrent de nombreuses sources potentielles d'ignition. Leur influence est ainsi étroitement liée à celle de la densité de population, qui constitue l'un des indicateurs les plus utilisés pour prendre en compte la pression anthropique exercée sur les paysages (Perpinyà et Pallarès-Barberà 2006).

Les routes concentrent les déplacements quotidiens et favorisent la fréquentation des espaces naturels, notamment forestiers. Leur proximité apparaît de manière récurrente parmi les principaux facteurs explicatifs des départs de feu dans les régions méditerranéennes européennes (Catry et al. 2009 ; Perpinyà et Pallarès-Barberà 2006). Elles constituent à la fois des vecteurs d'accès aux massifs forestiers et des lieux où se multiplient les sources accidentelles ou involontaires d'allumage.

Les réseaux ferroviaires et électriques occupent une position particulière dans l'aléa incendie : ils traversent et fragmentent les espaces végétalisés, peuvent introduire des sources d'allumage et constituent eux-mêmes des infrastructures exposées. La littérature consacrée à leur rôle dans les éclosions demeure toutefois peu abondante et repose principalement sur des études de cas.

L'analyse du réseau ferroviaire tchèque par Nezval et al. (2022) met ainsi en évidence une forte concentration spatiale des incendies : entre 2011 et 2019, 186 points chauds, représentant seulement 0,3 % de la longueur du réseau, regroupent 510 incendies. Leur occurrence est associée à la présence de végétation herbacée sèche, aux conditions chaudes et peu humides, à l'intensité du trafic de fret et, plus fréquemment, aux lignes électrifiées. Ces résultats suggèrent que l'aléa ne dépend pas de la seule présence de la voie, mais de la combinaison entre activité ferroviaire, état de la végétation riveraine et conditions météorologiques. Ils rejoignent les approches qui cherchent à localiser les tronçons sensibles afin d'y cibler l'entretien ou la modification de la végétation, comme dans le projet européen NATURE-DEMO (Symmank, Mohammadzadeh, et Szymczak 2025). Les recommandations qui en découlent ne constituent cependant pas un modèle directement généralisable, car les mécanismes d'éclosion et les mesures pertinentes dépendent du matériel roulant, de la configuration des emprises, des combustibles et des pratiques locales. Les travaux conduits dans les landes côtières norvégiennes confirment plus largement cette nécessité d'adapter les mesures aux caractéristiques propres de chaque interface entre végétation et activités humaines (Gjedrem et Metallinou 2023).

En ce qui concerne les réseaux électriques, le corpus disponible est encore plus restreint et largement dominé par le cas californien. Les lignes aériennes y sont étudiées à la fois comme sources possibles d'incendie et comme objets de politiques de prévention dont les coûts et les effets sont inégalement répartis. Les coupures électriques préventives peuvent réduire l'exposition à certaines ignitions, mais elles déplacent une partie du risque vers la perte de continuité électrique et soulèvent des questions de responsabilité, de compensation et de justice sociale (Babrauskas 2024). L'augmentation de l'adoption de batteries domestiques à la suite de coupures répétées montre ainsi que les ménages investissent pour se protéger contre cette dégradation de la fiabilité du service, avec des capacités d'adaptation nécessairement inégales (Brown et Muehlenbachs 2024).

Le rôle des réseaux ne se limite pas à l'éclosion. Un incendie peut affecter simultanément les infrastructures électriques et de transport, puis propager ses effets à d'autres services et aux populations qui en dépendent. L'étude menée dans le sud de la France dans le cadre d'EU-CIRCLE met précisément en avant ces interdépendances et la nécessité d'associer opérateurs, services de secours et acteurs territoriaux dans l'analyse de la résilience (Sfetsos et al. 2021). En l'état, cette littérature ne permet donc pas d'estimer une contribution générique des réseaux à l'aléa d'éclosion en Europe. Elle justifie plutôt une analyse territorialisée combinant sources potentielles d'allumage, entretien des emprises, continuité des services et effets en cascade.

La densité de population constitue un autre indicateur majeur de l'aléa d'éclosion puisqu'elle reflète l'intensité des activités humaines susceptibles de provoquer un départ de feu (Costa et al. 2011; Kustov et al. 2023). Plus la densité de population est élevée, plus les sources d'allumage sont nombreuses. Par exemple, en Catalogne,

les probabilités d'allumage sont particulièrement élevées aux abords de la métropole de Barcelone en raison de la très forte densité de population et de la très grande accessibilité aux zones forestières depuis les interfaces ville — espace naturel (Perpinyà et Pallarès-Barberà 2006). Toutefois, cette relation n'est pas linéaire. Au-delà d'un certain niveau d'urbanisation, la fragmentation des combustibles, la rapidité de détection de départs de feu et la proximité des moyens d'intervention limitent le nombre d'incendies. Les zones périurbaines ou à l'urbanisation diffuse apparaissent ainsi particulièrement propices aux départs de feu, car elles combinent une disponibilité importante en combustibles, une forte fréquentation humaine et une accessibilité plus réduite pour les services de lutte (Pausas et Keeley 2021 ; Perpinyà et Pallarès-Barberà 2006 ; Perpinyà et al. 2011).

Ces résultats montrent que les infrastructures et la densité de population ne constituent pas des facteurs indépendants, mais différentes expressions d'une même pression anthropique sur les territoires. Leur influence s'exprime pleinement dans les interfaces ville — espace naturel, où se concentrent simultanément les populations, les infrastructures, les combustibles et donc les sources potentielles d'allumage (Oliveira et al. 2012 ; Perpinyà et Pallarès-Barberà 2006).

2.5.3. Les interfaces ville — espace naturel comme zone de convergence de l'aléa incendie

La densité de population n'est pas le seul facteur explicatif de l'aléa incendie dans les interfaces ville — espace naturel. Elles présentent aussi une organisation spatiale particulièrement favorable à la pénétration du feu dans les milieux urbanisés. En effet, elles sont composées d'une grande variété de combustibles, combinant végétation naturelle, espaces agricoles, jardins privés et végétation ornementale (*wildland fuels*) auxquels s'ajoutent les matériels combustibles liés au bâti (*built fuels*) (Lampin-Maillet et al. 2011 ; Spyratos, Bourgeron, et Ghil 2007). Les combustibles de surface de type herbacées peuvent aussi jouer un rôle (Scarpa et al. 2024). Les haies, terrasses, clôtures, plantations ornementales et autres aménagements paysagers créent ainsi de nombreux relais potentiels de propagation entre les espaces naturels et les habitations (Ezz et al. 2022 ; Ganteaume et al. 2021) (voir Chap. 3, Vulnérabilité et 6, Prévention).

Cette configuration spatiale explique que les interfaces concentrent aujourd'hui une très grande partie des départs de feu observés dans les régions méditerranéennes européennes, où près de 90 % des incendies sont d'origine anthropique (Bento-Gonçalves et Vieira 2020 ; Ganteaume et al. 2021 ; Vázquez, Moreno, et Moreno 1998 ; Vilar et al. 2016). Elles concentrent également les principaux enjeux humains et économiques (habitations, infrastructures, tourisme, sites industriels) faisant des interfaces des territoires où se superposent aléa, exposition et vulnérabilité (Chappaz et Ganteaume 2023 ; Planas et al. 2023 ; Schug et al. 2023) (voir Chap. 1, Interfaces).

L'analyse département par département de Ganteaume et Jappiot (2013) a, toutefois, révélé une forte variabilité spatiale des causes de départs de feu en région méditerranéenne française.

Les grands feux (au-delà de 100 ha) sont associés dans plus de 40 % des cas à des actes volontaires (pyromanie, conflits avec chasseurs/bergers), à une forte proportion de maquis-garrigues et de pâturages, à une densité importante de routes secondaires et de voies ferrées, ainsi qu'à des conditions de sécheresse au printemps et à l'automne. Ces conditions sont typiquement réunies dans le département des Bouches-du-Rhône. La pression touristique est davantage en jeu dans les départements du Var et de la Haute-Corse.

À l'inverse, les secteurs plus montagneux, plus humides à l'automne et en hiver et/ou dominés par des peuplements forestiers denses (comme par exemple les Alpes-de-Haute-Provence et les Hautes-Alpes) présentent généralement des incendies de plus faible superficie faisant suite à des négligences.

Il est important de souligner ici que l'influence de la couverture forestière sur la taille des incendies reste discutée dans la littérature, certaines études européennes mettant au contraire en évidence une association entre massifs forestiers continus et grandes superficies brûlées (Bajocco et Ricotta 2008 ; Catry et al. 2009 ; Moreira et al. 2010).

L'évolution récente de l'occupation des sols renforce progressivement cette concentration des facteurs d'aléa dans les interfaces. Depuis plusieurs décennies, la déprise agricole, la fermeture des paysages par les formations arbustives et forestières ainsi que les politiques de suppression systématique des incendies favorisent une accumulation importante de biomasse et une augmentation de la continuité des combustibles (Kontoes et al. 2013). Parallèlement, l'expansion de l'urbanisation diffuse multiplie les situations où des habitations sont implantées à proximité immédiate de massifs forestiers ou d'anciens espaces agricoles recolonisés par la végétation. Dans les régions méditerranéennes, le nombre d'habitations situées dans les interfaces a augmenté de 20 % entre 1975 et 2023 (Pandey et al. 2023) (voir chap. 1, Interfaces).

Cette double dynamique accroît simultanément les probabilités d'éclosion et le potentiel de propagation des incendies en rapprochant toujours davantage les sources potentielles d'allumage et les zones où les combustibles sont abondants et continus. Les interfaces constituent ainsi des points chauds de l'aléa incendie, où interagissent les composantes anthropiques, structurelles et météorologiques de l'aléa (Ganteaume et al. 2021 ; Lampin-Maillet et al. 2011 ; Mercer et Zipperer 2012). L'effet des interfaces varie toutefois selon l'occupation du sol : elles présentent généralement davantage de départs de feu, mais des superficies brûlées plus faibles, avec des différences marquées entre plantations forestières, forêts indigènes, espaces agricoles et formations arbustives (Calviño-Cancela et al. 2016).

À titre d'exemple, près de 50 % des feux du département des Bouches-du-Rhône éclosent dans les zones d'interfaces (Pandey et al. 2023).

Plusieurs événements récents illustrent cette convergence des facteurs. Lors du feu de Rognac (Bouches-du-Rhône), en août 2016, environ 80 % des 2 669 hectares brûlés correspondaient à des zones urbaines ou d'interface (Ganteaume et al. 2021). De même, l'incendie de Mati, en Grèce, en juillet 2018, a montré comment l'imbrication du bâti, d'une végétation très inflammable et de l'absence de discontinuités pouvait favoriser une propagation extrêmement rapide, avec des conséquences humaines dramatiques (102 morts et 106 blessés). Ces événements illustrent que les interfaces ne concentrent pas uniquement les départs d'incendie ; elles réunissent également les conditions favorables à leur propagation et les enjeux les plus exposés. Cette réalité impose une approche intégrée et évolutive de l'aléa dans ces interfaces ville — espace naturel (Chappaz et Ganteaume 2023).

2.5.4. Distinction entre aléa d'éclosion et propagation

Une fréquence élevée des départs de feu ne se traduit pas nécessairement par davantage de grands incendies. Les facteurs qui contrôlent l'éclosion d'un incendie diffèrent en effet de ceux qui gouvernent ensuite sa propagation. Alors que les départs de feu sont principalement déterminés par la pression anthropique, les grands incendies se développent préférentiellement dans des territoires où les conditions météorologiques, la structure des combustibles et l'organisation du paysage favorisent leur extension (Bajocco et Ricotta 2008 ; Marques et al. 2011 ; Perpinyà et Pallarès-Barberà 2006).

Les grands incendies tendent ainsi à se produire dans des zones rurales ou périurbaines, en périphérie des zones densément peuplées ou bien dans des territoires marqués par la déprise agricole, caractérisés par une détection plus tardive des départs de feu, ainsi qu'une accessibilité plus limitée pour les moyens de lutte et une grande continuité des combustibles (Bajocco et Ricotta 2008 ; Marques et al. 2011 ; Perpinyà et Pallarès-Barberà 2006) (voir Chap.1, Interfaces).

Cette distinction a été quantifiée par Ruffault et Mouillot (2017) en analysant 6381 incendies survenus entre 1990 et 2006 dans la région méditerranéenne française à partir de la base de données Prométhée, pour lesquels la moyenne de la superficie brûlée est de 6,5 hectares et où seuls 16 feux dépassent les 400 hectares. Pour l'ensemble des incendies, les facteurs anthropiques (densité du réseau routier, proportion d'interfaces ville — espace naturel, densité d'habitations) dominent, expliquant jusqu'à 26 % de la variance des superficies brûlées pour les interfaces, 19 % pour la longueur de la saison propice aux incendies et 16 % pour la densité routière. En revanche, si on considère que les incendies de plus grande taille (à partir de 10 hectares dans l'étude), l'influence des facteurs météorologiques-climatiques (sécheresse, vent) et d'occupation du sol

(continuité des combustibles, type de végétation) devient prépondérante (voir figure 9). Ceci confirme que la propagation dépend davantage des conditions météorologiques et de la structure du paysage que de la simple présence humaine (Duane, Castellnou, et Brotóns 2021 ; Fernandes, Barros, et al. 2016 ; Moreira et al. 2010).

Au Portugal, Fernandes et al. (2016) montrent même que la continuité des combustibles joue un rôle plus important que les facteurs météorologiques et climatiques pour expliquer la taille des incendies.

L'étude de Ruffault et Mouillot (2017) met également en évidence une augmentation de l'influence du vent avec la taille des incendies, ainsi que des contrastes régionaux sur la durée de la saison météorologique favorable aux incendies. Selon les territoires, celle-ci varie d'une quarantaine de jours par an dans l'ouest du bassin méditerranéen à près de 180 jours sur les secteurs littoraux plus secs.

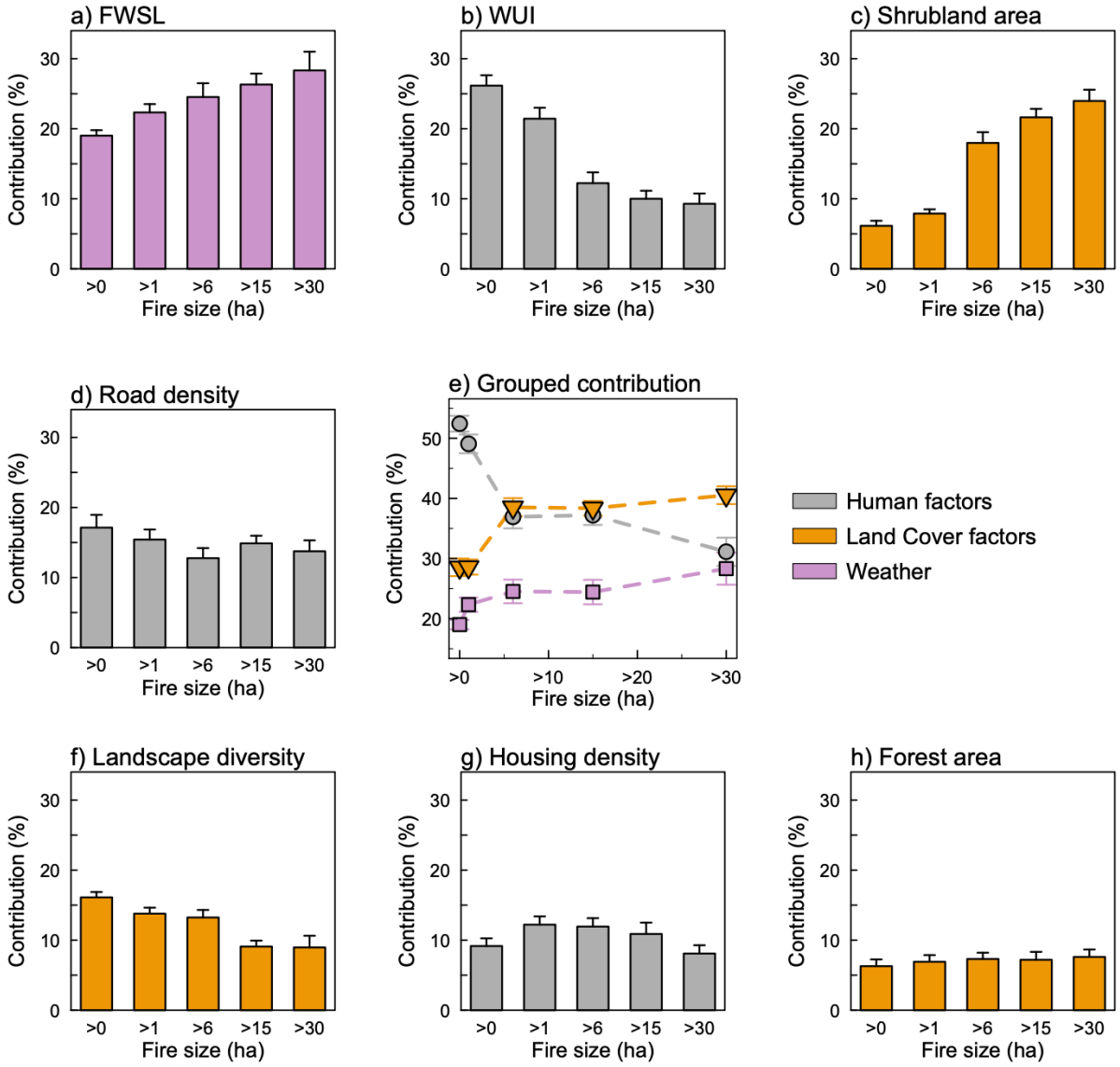


Figure 9 : Contribution relative des facteurs dans la distribution spatiale des feux analysée en fonction de la taille des incendies sur la période 1990-2006. FWSL correspond à la longueur de la saison des feux, WUI aux interfaces ville — espace naturel, *shrubland area* correspond à la prédominance de la végétation basse (Ruffault et Mouillot 2017).

2.5.5. Implications pour la prévention

À partir des années 1990, la forte concentration des allumages à proximité des zones habitées a conduit à l'adoption d'une nouvelle doctrine de lutte, la « doctrine Vulcain », fondée sur l'attaque des feux naissants dans les dix premières minutes suivant leur détection. Celle-ci a été rendue possible grâce au développement du guet

aérien armé et au prépositionnement des moyens lors des journées de fort danger incendie (Battesti 1997). Cette politique de suppression a nettement contribué à contenir les surfaces brûlées, comme en témoignent à la fois la très forte diminution des surfaces brûlées à partir des années 1990, malgré un nombre d'incendies relativement constant (voir figure 10), et la singularité statistique de la zone méditerranéenne française, bien moins impactée que les autres pays européens (voir figure 11) (Pandey et al. 2023 ; Turco et al. 2016).

Cette politique a toutefois favorisé, à long terme, une accumulation progressive des combustibles en limitant les incendies de faible ampleur (Curt et al. 2016; Ruffault et Mouillot 2015).

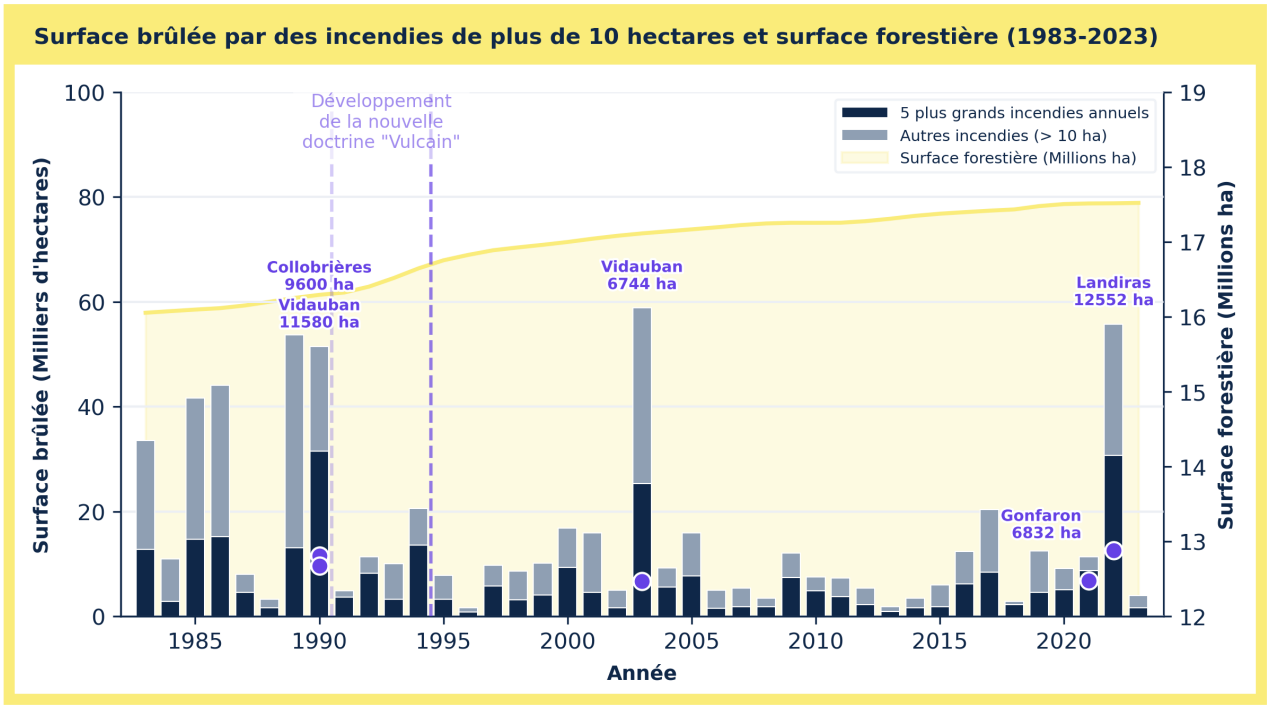


Figure 10 : Surfaces brûlées annuelles (uniquement les incendies supérieurs à 10 hectares) et évolution de la surface forestière en France (1983-2023). Les barres représentent la surface brûlée en distinguant la contribution des 5 plus grands feux de l'année (bleu foncé) du reste (gris). La courbe de fond montre l'évolution de la surface forestière. Source : ministère de l'Agriculture, Base de Données sur les Incendies de Forêt (BDIF) et Séries longues sur l'occupation des sols (Agreste).

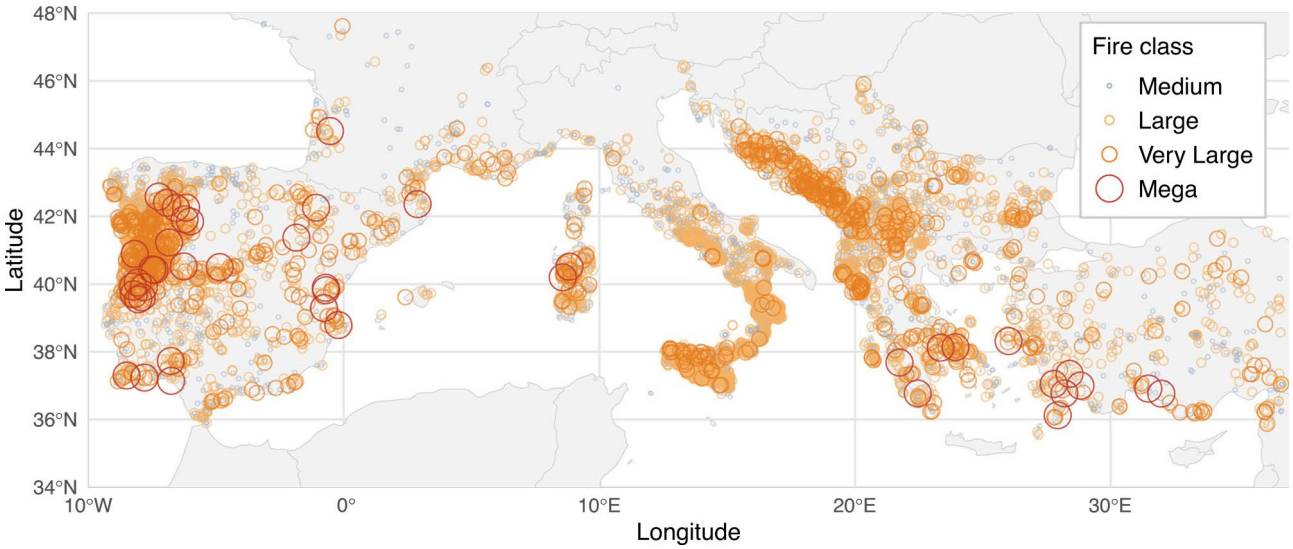


Figure 11 : Répartition spatiale des incendies de végétation suivant leur surface en hectares (Medium : 30-100, Large : 100-1 000, Very Large : 1 000-10 000 et Mega ≥ 10 000 ha) dans la région euro-méditerranéenne sur la période 2008-2022 (Ghasemiazma et al. 2026).

L'augmentation continue de la surface forestière, la fermeture des paysages et l'expansion des interfaces ville — espace naturel modifient progressivement les facteurs limitants de l'activité incendie. Dans de nombreux territoires méditerranéens, le combustible n'apparaît plus comme une ressource limitante. Ce sont désormais la sécheresse combinée à des épisodes météorologiques extrêmes et leur synchronisation avec des départs de feu qui déterminent les grands incendies (Pausas et Fernández-Muñoz 2012 ; Ruffault et Mouillot 2015). Cette évolution interroge la capacité des stratégies centrées exclusivement sur l'attaque des feux naissants à long terme, à faire face à l'évolution de l'aléa incendie dans un contexte de changement climatique et d'augmentation attendue des situations favorables aux incendies extrêmes (Cardil et al. 2025 ; Ganteaume et al. 2021 ; Pandey et al. 2023) (voir Chap. 7, Gestion de crise, sécurité civile et comportements en situation de crise).

Les politiques de prévention des grands incendies ne peuvent plus reposer uniquement sur la l'extinction précoce des feux éclos. Si celle-ci demeure indispensable, elle ne suffit plus lorsque les conditions de propagation deviennent particulièrement favorables (Duff, Bell, et York 2013 ; Pausas et Keeley 2021 ; Schug et al. 2023). L'évolution conjointe des usages des sols, de la déprise agricole et de l'accumulation de biomasse a ainsi progressivement déplacé le contrôle de l'activité incendie d'un régime limité par la disponibilité des combustibles vers un régime davantage gouverné par les sécheresses et les conditions météorologiques extrêmes (Neidermeier et al. 2023 ; Pausas et Fernández-Muñoz 2012). De plus, plusieurs travaux suggèrent que la région méditerranéenne française atteindrait une forme de saturation des allumages, où une diminution marginale des départs de feu n'entraîne plus une réduction proportionnelle de l'activité incendie (Pausas et Keeley 2021).

Dans ce contexte, plusieurs leviers complémentaires sont à activer pour une prévention efficace : la réduction des sources d'allumage, la gestion de la charge et de la continuité des combustibles, l'aménagement des interfaces ville — espace naturel, la maîtrise de l'urbanisation, l'adaptation des constructions et des infrastructures, ainsi que la sensibilisation des populations (voir Chap. 6, Gestion et prévention du risque incendie et 8, Urbanisme et gouvernance). Les interfaces ville — espace naturel constituent ainsi des territoires prioritaires pour la prévention et requièrent une approche intégrée de l'aléa pour renforcer la résilience des territoires face aux incendies (Abdollahi et Yebra 2025 ; Murray et al. 2023 ; Pandey et al. 2023 ; Tsakaldimi et al. 2023).

2.6. Mesurer et caractériser l'aléa incendie

2.6.1. La notion d'évènements extrêmes

L'aléa incendie de végétation, en particulier à l'interface entre espaces naturels et espaces habités, ne peut être décrit selon une logique de « normalité » fondée sur une valeur moyenne représentative. Il relève d'un système fortement non linéaire, dans lequel l'accumulation des combustibles, la structuration des paysages et les conditions de vulnérabilité se construisent lentement, alors que l'incendie lui-même correspond à une libération rapide d'énergie (Malamud, Morein, et Turcotte 1998 ; Reed et McKelvey 2002). Dans de tels systèmes, de faibles écarts dans les conditions initiales ou locales, humidité des combustibles, vent, continuité de la végétation, délai ou efficacité des premières attaques par les secours, peuvent suffire à faire basculer un départ de feu vers une extinction rapide ou, au contraire, vers un événement majeur (Tedim et al. 2018; Werth et al. 2016). Il en résulte une distribution très dissymétrique des tailles, des intensités et des impacts : une majorité d'incendies reste de petite taille, tandis qu'un petit nombre d'événements concentre l'essentiel des superficies brûlées et des dommages aux personnes, aux biens et à l'environnement (Hantson, Pueyo, et Chuvieco 2016 ; Lin et al. 2014 ; Malamud et al. 1998 ; Royé et al. 2020). Dans ce cadre, il n'existe donc pas d'« incendie moyen » ni d'« écart type » réellement pertinent pour penser les situations les plus graves : ce sont au contraire les événements rares et disproportionnés qui structurent le risque (voir chap. 4, Conséquences).

Parler d'« incendies extrêmes » a ainsi un sens précis. Il ne s'agit pas d'anomalies extérieures au système, mais d'une propriété structurelle des régimes de feu, caractérisés par des distributions statistiques où la concentration des effets se trouve essentiellement dans un petit nombre d'événements situés en queue de distribution

(Malamud et al. 1998 ; Reed et McKelvey 2002 ; Tedim et al. 2018). La difficulté pour les appréhender ne tient donc pas à l'existence de ces extrêmes, mais à leur définition partagée entre acteurs, par exemple un quantile statistique (1 % les plus étendus) ou une période de retour (décennale, centennale…) (voir Zoom sur les seuils).

Il est important de noter que de nombreuses études en France cherchent à caractériser les facteurs explicatifs des incendies de plus de 100 hectares (Ganteaume et al. 2013 ; Ruffault, Moron, et al. 2017). Toutefois, au vu des tendances actuelles dans l'ensemble des pays euro-méditerranéens, il devient important de caractériser plus spécifiquement la conjonction de facteurs rendant possible l'émergence d'incendies de plus de 1000 hectares, voire 10 000 hectares (Alló et Loureiro 2020 ; Dimitrakopoulos, Gogi, et al. 2011 ; Ferreira-Leite et al. 2017 ; Ghasemiazma et al. 2026 ; Kontoes et al. 2013 ; San-Miguel-Ayanz et al. 2012), comme l'illustrent en France les évènements catastrophiques de Gonfaron (6 382 hectares) en 2021, de Landiras et La Teste-de-Buch en 2022 (12 552 et 6 742 hectares) et de Ribaute en 2025 (11 133 hectares). Source : BDIFF[5].

L'enjeu n'est donc pas de savoir si les incendies extrêmes existent, mais à partir de quel niveau on choisit de les qualifier ainsi, dans quel territoire, et selon quelles métriques d'impact. Cette qualification reste en outre contextuelle, car la fréquence, la forme et les conséquences de ces événements dépendent des climats, des structures paysagères, des usages des sols, des pratiques humaines et des politiques de gestion, qui peuvent à la fois modifier leur probabilité d'occurrence et leur gravité (Chuvieco et al. 2021 ; Moreira et al. 2020).

Dans ce contexte, l'évaluation de l'aléa ne peut se limiter au seul nombre de départs de feu. Elle doit également intégrer le potentiel de propagation, la continuité ou l'hétérogénéité des combustibles, les conditions météorologiques et la proximité des zones habitées ou même les politiques de suppression (Evin, Curt, et Eckert 2018), afin d'identifier les configurations favorables à des événements rares mais à forts impacts.

2.6.2. Indices de danger incendie

En France, l'indice forêt-météo (IFM), ou *Fire Weather Index* (FWI) (Fujioka et al. 2009 ; Wagner 1987), s'est imposé comme un outil météorologique central pour l'évaluation et la prévision du danger incendie, d'abord à travers l'appui opérationnel de Météo-France à la sécurité civile, puis plus récemment via des dispositifs d'information à destination du grand public, tels que « La météo des forêts » (voir Zoom sur l'IFM). À noter qu'au-delà de la France, l'usage de l'indice IFM est très répandu (Vitolo et al. 2020).

Cet indice repose sur des prévisions météorologiques (température, humidité relative, vent et précipitations). En France, l'IFM est calculé quotidiennement par Météo-France à partir du modèle de prévision numérique AROME, à une résolution kilométrique, afin de produire des niveaux de danger incendie à l'échelle intra-départementale. Son calcul s'appuie sur une chaîne de sous-indices représentant l'état hydrique du sol, et donc indirectement celui de la végétation, ainsi que la capacité de propagation du feu, ce qui permet de caractériser le danger incendie à court terme (de J à J+1). Ces produits alimentent directement la gestion opérationnelle des incendies, notamment le prépositionnement des moyens, le déclenchement de niveaux d'alerte et les restrictions d'accès aux massifs forestiers.

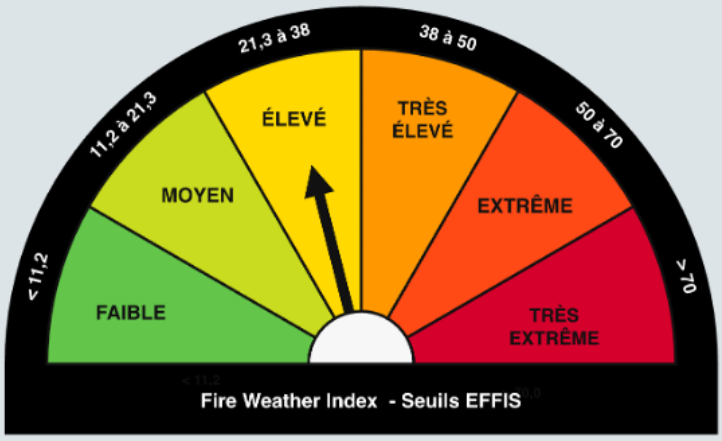
Zoom sur l'Indice Forêt-Météo — *Fire Weather Index* (FWI)

Le système FWI (*Fire Weather Index*, Indice forêt-météo IFM) est l'indice le plus répandu, en recherche comme en opérationnel, pour évaluer le danger des incendies. Il se compose de 6 éléments qui prennent en compte les effets de l'humidité du combustible et des conditions météorologiques sur le comportement du feu. Les trois premiers éléments sont des indices d'humidité du combustible, qui correspondent à des valeurs numériques représentant la teneur en humidité du sol forestier et d'autres matières organiques mortes. Leurs valeurs augmentent à mesure que la teneur en humidité diminue.

Les trois composantes restantes sont des indices de comportement du feu, qui représentent la vitesse de propagation du feu, le combustible disponible pour la combustion et l'intensité frontale du feu ; ces trois valeurs augmentent à mesure que l'aléa incendie s'accroît. Le calcul de FWI repose sur des valeurs

[5] https://bdiff.agriculture.gouv.fr/

quotidiennes consécutives de la température, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et des précipitations. Dans le système EFFIS (*European Forest Fire Information System*), l'indice est classé en 6 catégories : faible <11,2, moyen 11,2 à 21,3, élevé 21,3 à 38,0, très élevé 38,0 à 50,0, extrême 50,0 à 70,0 et très extrême >70,0.



Plusieurs études ont montré que l'IFM possède une réelle capacité prédictive en France. Il reproduit la variabilité spatio-temporelle à grande échelle du danger incendie, rend compte de la saisonnalité de l'activité incendie et est associé à l'occurrence de grands feux, ainsi qu'à des comportements extrêmes, en particulier dans le Sud-Est de la France (Ager et al. 2014). Il constitue ainsi un indicateur pertinent pour l'alerte et la planification des moyens (Dimitrakopoulos, Bemmerzouk, et Mitsopoulos 2011 ; Lahaye et al. 2018). De plus, il est prometteur pour fournir un indicateur pertinent à l'échelle saisonnière pendant l'été, avec une prévisibilité d'un mois (Bedia et al. 2017).

Toutefois, les performances de l'IFM présentent certaines limites. En contexte méditerranéen, les grands incendies sont le plus souvent fortement pilotés par le vent ; or, des phénomènes de saturation peuvent apparaître pour des vents forts, ce qui rend plus difficile la discrimination des niveaux de danger dans ces situations. Par ailleurs, des décalages de saisonnalité ont été observés, avec une tendance à surestimer le danger en début de saison et à le sous-estimer en fin de saison. Plus largement, l'IFM ne prend pas explicitement en compte certains déterminants majeurs de l'aléa, tels que l'humidité des combustibles vivants, les caractéristiques structurelles de la végétation ou encore les allumages, largement influencés par les activités humaines (Barbero et al. 2019 ; Castel-Clavera et al. 2025 ; Pimont et al. 2021 ; Ruffault et Mouillot 2017).

Pour pallier ces limites, de nouveaux indices sont proposés pour compléter l'IFM, notamment afin d'identifier les conditions propices au développement de la pyroconvection associée aux évènements extrêmes d'incendie (Artés et al. 2022 ; Castellnou et al. 2022 ; Giannaros et al. 2022).

2.6.3. Limites des indices de danger incendie et approches probabilistes complémentaires

L'IFM ne fournit pas directement une probabilité d'occurrence d'incendie. Les approches probabilistes complètent ces outils en intégrant, au-delà de la seule météorologie, la distribution des combustibles (occupation du sol, charge et continuité du couvert végétal), la topographie (pente, exposition), ainsi que les sources d'allumage, souvent d'origine anthropique. Elles mobilisent des modèles statistiques ou de simulation, par exemple fondés sur des processus stochastiques ou sur des simulations de propagation, afin d'estimer des probabilités d'occurrence de feu, des probabilités de brûler, des trajectoires de propagation et des scénarios d'impact (Alcasena et al. 2015 ; Alcasena, Salis, et Vega-García 2016 ; Allaire et al. 2022 ; Bedia, Herrera, et Gutiérrez 2014 ; Di Giuseppe et al. 2016 ; Finney, McHugh, et al. 2011 ; Parisien et al. 2019 ; Pimont et al. 2021). Ces approches rapprochent ainsi l'outil de décision d'une estimation probabiliste du comportement possible de l'incendie (Finney 2005 ; Finney, Grenfell, et al. 2011) et des conséquences associées, particulièrement pertinente dans les interfaces ville — espace naturel. Elles peuvent être également intéressantes pour étudier des stratégies de prévention comme les traitements sylvicoles (éclaircissage, brûlage dirigé) et les coupe-feux ainsi que leurs impacts sur

le comportement potentiel d'un incendie et notamment la réduction de son intensité potentielle (Duguy et al. 2007 ; Schmidt, Taylor, et Skinner 2008). Des approches récentes fondées sur l'apprentissage automatique cherchent également à prédire directement l'activité incendie, plutôt que le seul danger météorologique, en combinant des informations sur les combustibles, les sources d'allumage et l'activité incendie observée ; leurs performances apparaissent notamment fortement dépendantes de la qualité des données utilisées (Di Giuseppe et al. 2025).

En complément, des approches à base physique (représentant l'ensemble des mécanismes physiques en jeu dans la propagation du feu — dégradation thermique du végétal, combustion et transferts thermiques) peuvent permettre de mieux caractériser l'inflammabilité des espèces végétales présentes dans les interfaces (Terrei, Lamorlette, et Ganteaume 2019).

L'enjeu est dès lors de combiner ces approches afin de produire une évaluation intégrée de l'aléa (Thompson et al. 2016), adaptée aux différentes échelles de décision, du national au local, ainsi qu'aux dynamiques territoriales, notamment dans un contexte de changement climatique et d'évolution des usages des sols.

Zoom sur les différents seuils et notions mobilisés pour qualifier la sévérité des incendies

La littérature distingue plusieurs façons de qualifier les incendies extrêmes : par la surface parcourue, par le comportement du feu et le dépassement des capacités de lutte, ou encore a posteriori par l'ampleur des dommages. Un incendie peut être qualifié d'extrême dès lors qu'il dépasse un ou plusieurs de ces seuils, mais cette qualification reste dépendante du contexte et de l'objectif poursuivi. La période de retour, c'est-à-dire l'intervalle moyen séparant dans une région donnée deux événements dépassant un seuil donné, constitue à cet égard un repère central, notamment pour analyser l'effet du changement climatique développé au Chapitre 5, Changements globaux.

Type de seuil	Ce que le seuil renseigne
Les seuils en France (Evin et al. 2018; Ganteaume et al. 2013 ; Pimont et al. 2021)	On distingue souvent les feux « échappés » (> 1 ha), les « incendies » de 10 à 100 ha, puis les « grands incendies » (> 100 ha). L'extrême se qualifie surtout sur la rareté statistique ou la période de retour.
Péninsule Ibérique, grands incendies forestiers (GIF) (Alló et Loureiro 2020)	En Espagne, le seuil le plus courant pour les grands incendies est > 500 ha. Il renvoie à la fois à la taille finale et à une difficulté accrue de maîtrise.
UE/EFFIS — classes de suivi harmonisées (San-Miguel-Ayanz et al. 2012)	EFFIS distingue 5 classes : ≤ 100 ha, 100-500 ha, 500-1 000 ha, 1 000-5 000 ha et > 5 000 ha. Ce cadre est largement utilisé pour les comparaisons européennes.
Europe méditerranéenne (Ghasemiazma et al. 2026)	Cette échelle propose 30-100 ha, 100-1 000 ha, 1 000-10 000 ha et ≥ 10 000 ha (appelé Mega). Elle est utile pour comparer les feux à l'échelle euro-méditerranéenne et utilisée en Figure 8.
Europe — grand feu contextuel (Duane et al. 2025)	Ici, un feu est dit grand s'il est rare à l'échelle locale et au regard de sa période de retour (115 zones définies en Europe). L'approche est robuste statistiquement, mais moins lisible qu'un seuil fixe.
Par comportement, *Extreme Wildfire Event* (Tedim et al. 2018)	Un EWE est défini sur des observations pendant le feu : Intensité ≥ 10 MW/m, vitesse ≥ 50 m/min, sautes de feu > 1 km. L'objectif est de distinguer le dépassement des capacités d'extinction.

Catastrophe/désastre par impacts (Delforge et al. 2025)	EM-DAT qualifie un désastre à partir des conséquences humaines ou institutionnelles telles que ≥ 10 morts, ≥ 100 personnes affectées, état d'urgence ou appel à l'aide internationale.

2.6.4. Vers une évolution des régimes de feu

Les incendies de végétation ne peuvent pas être considérés comme un aléa strictement naturel, mais constituent un aléa socio-environnemental résultant d'interactions complexes entre dynamiques climatiques, écosystémiques et territoriales, dont le poids varie selon les échelles spatio-temporelles considérées (Oliveira et al. 2012 ; Pausas et Keeley 2014 ; Ruffault et Mouillot 2017). À court terme, la météorologie, l'humidité des combustibles et les activités humaines dominent. À plus long terme, ce sont la structure des paysages, l'occupation des sols et l'extension des interfaces ville — espace naturel qui conditionnent l'exposition des territoires aux incendies (Moreira et al. 2020). À grande échelle, le climat explique l'essentiel de la variabilité interannuelle de l'activité feu, tandis que les facteurs humains et paysagers en structurent la distribution spatiale locale (Costa et al. 2011 ; Ganteaume et Long-Fournel 2015 ; Ruffault et Mouillot 2017 ; Urbieta et al. 2015, 2019).

Si l'augmentation des températures, des sécheresses et l'allongement des saisons de feu accroissent la probabilité de situations propices aux incendies, les dynamiques socio-économiques ont aussi favorisé l'accumulation des combustibles. Toutefois, le poids relatif du climat (voir Chap. 5, Changements globaux) est appelé à croître. Cette influence s'exerce notamment par les modifications du régime des précipitations saisonnières, la multiplication des vagues de chaleur, mais aussi par une atmosphère globalement plus chaude, plus instable et parfois plus sèche, favorable au développement de mouvements convectifs intenses. Dans ces conditions, les incendies peuvent générer des panaches plus puissants, capables d'interagir davantage avec l'atmosphère environnante et d'alimenter en retour leur propre dynamique.

Ces situations favorisent des régimes de feu convectifs, marqués par de forts effets de panache, des vitesses de propagation très élevées, des intensités de front extrêmes, des sautes de feu à grande distance et la multiplication de foyers secondaires. Ces derniers peuvent résulter de la combinaison de plusieurs mécanismes, notamment le transport à distance de braises par un vent fort, leur injection en altitude par le panache convectif, puis leur retombée en avant du front principal, y compris en zone urbaine (voir Chap. 4, Conséquences).

Dans les cas les plus sévères, ces dynamiques peuvent s'accompagner de phénomènes de coalescence d'incendies, d'une convection intense et de sautes de feu rendant le comportement des incendies erratique, autorenforcé et difficilement prévisible (Athanasiou et al. 2025 ; Finney et McAllister 2011 ; Tedim et al. 2018), la saison 2003 en France en étant une illustration. Elles peuvent également être associées à des environnements propices aux orages secs, qui constituent eux-mêmes une source supplémentaire d'ignition, comme pour l'incendie de Pedrógão Grande en 2017 au Portugal (Tedim et al. 2018 ; Werth et al. 2016).

La probabilité accrue de basculement vers des incendies extrêmes, dépassant les capacités de contrôle et menaçant directement les interfaces, notamment en région méditerranéenne et atlantique, rend indispensable le développement d'indicateurs de danger et d'outils adaptés aux contextes régionaux (Bowman et al. 2017 ; Chuvieco et al. 2023 ; Li et Banerjee 2021 ; Moreira et al. 2011). Aux USA, un indice de danger extrême (SFDI pour *Severe Fire Danger Index*) a ainsi été mis en place pour mieux estimer les variations géographiques et saisonnières de l'activité feu et de son intensité, et a démontré son potentiel pour anticiper le développement d'évènements extrêmes d'incendies (Jolly et al. 2019).

L'enjeu est d'identifier où et quand les seuils critiques, ou points de bascule, peuvent être franchis simultanément (Pausas et Keeley 2021), notamment dans les zones d'interface, comme l'illustrent les feux catastrophiques de Rognac en France (2016) et Mati en Grèce (2018).

3. Lacunes de connaissances et controverses

Malgré des avancées importantes, l'évaluation de l'aléa incendie se heurte encore à l'hétérogénéité des données, à la rareté des événements extrêmes et aux difficultés d'intégrer toutes ses composantes. De plus, des controverses subsistent quant aux effets comparés des types de peuplements forestiers et des politiques de suppression, ces dernières pouvant parfois conduire à des effets plus néfastes que bénéfiques en favorisant l'accumulation des combustibles (Moreira et al. 2020 ; Ricotta, Guglietta, et Migliozzi 2012).

La littérature consacrée à l'aléa incendie est abondante pour les régions méditerranéennes, mais demeure beaucoup plus limitée pour le reste du territoire français. L'étude de Barbero et al. (2019) figure parmi les rares travaux ayant analysé l'influence des conditions météorologiques et climatiques sur les grands incendies à l'échelle de l'ensemble de la France. Ce déséquilibre reflète l'histoire du risque incendie en France : jusqu'à une période récente, l'aléa feu concernait principalement le bassin méditerranéen, tandis que les autres régions étaient relativement peu concernées. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, sous l'effet du changement climatique notamment, a toutefois profondément modifié cette situation en favorisant l'émergence de grands incendies plus au Nord et à plus haute altitude. Le nombre d'observations de grands incendies hors du bassin méditerranéen reste donc trop limité pour permettre de bien caractériser les spécificités de ces nouveaux territoires du feu. Des lacunes similaires existent concernant la réponse des écosystèmes forestiers. Les espèces végétales des régions tempérées, qui ont peu ou pas coévolué avec le feu, pourraient présenter une plus grande vulnérabilité aux incendies que les espèces méditerranéennes, mais cette hypothèse demeure encore peu documentée. Il y a donc un enjeu à étudier la relation entre les incendies et ces écosystèmes dans un contexte d'adaptation au changement climatique, où la végétation a une double exposition aux sécheresses et aux incendies.

Si la littérature reste géographiquement inégale, les connaissances convergent néanmoins sur une idée centrale : l'aléa est gouverné par des seuils critiques issus de facteurs biophysiques et anthropiques, nécessitant des stratégies territorialisées appuyées par le développement d'approches de modélisation probabiliste intégrant l'incertitude (Finney, McHugh, et al. 2011 ; Tedim et al. 2018).

4. Conclusion

En conclusion, l'aléa incendie en France est un aléa profondément socio-écologique combinant des facteurs biophysiques et anthropiques. Il est gouverné par des seuils liés à la disponibilité de combustible végétal, à la probabilité de départ de feu, aux conditions météorologiques propices au feu et à la sévérité. Il connaît aujourd'hui une mutation profonde sous l'effet des dynamiques climatiques et humaines, (voir Chap. 5, Changements globaux).

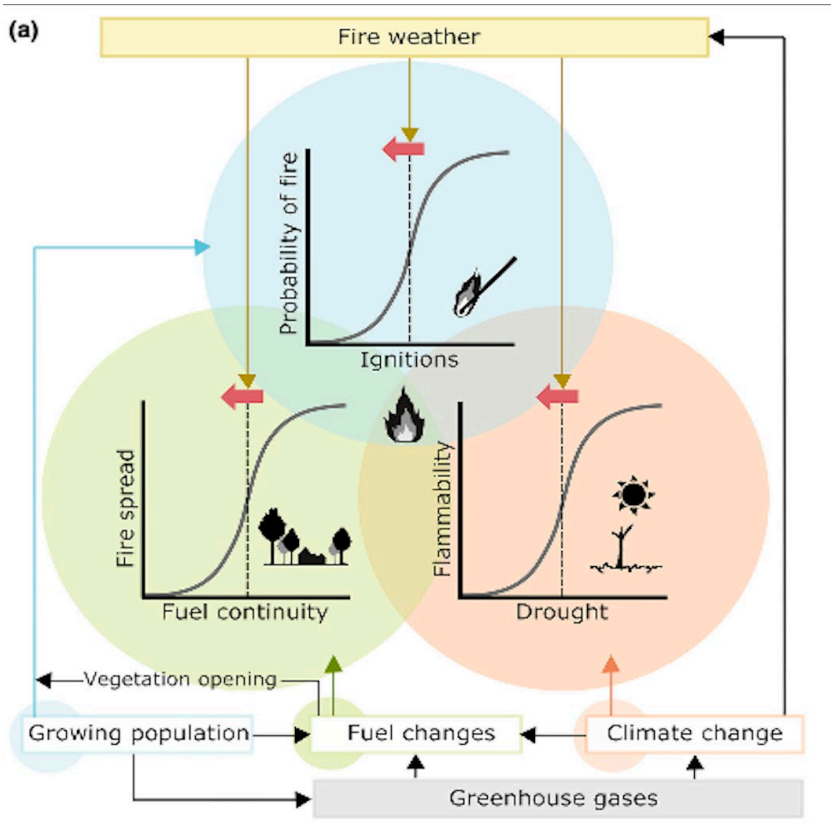


Figure 12 : Schéma conceptuel montrant les relations entre les paramètres du feu (allumages, continuité des combustibles, sécheresses) et leurs déterminants (changement climatique, occupation des sols et changement des combustibles, évolution démographique) (Pausas et Keeley 2021)

Les interfaces ville — espace naturel constituent des espaces majeurs de convergence et d'amplification du danger : elles concentrent les densités de population, les mobilités quotidiennes et des continuités de combustibles propices aux départs et aux sautes de feu (Ganteaume et al. 2013). L'expansion urbaine et la déprise agricole multiplient ces interfaces, tandis que des sécheresses plus fréquentes et persistantes favorisent l'extension géographique de l'aléa, en latitude comme en altitude. Cette évolution des régimes de feu rend l'aléa plus structurel à l'échelle de la France et appelle le développement d'une culture du risque incendie.

Face à l'aggravation combinée du changement climatique et de l'extension de ces zones, l'enjeu principal est désormais d'anticiper l'occurrence des grands feux et d'adapter les territoires par une gestion intégrée des combustibles et de l'aménagement (voir Chap. 8, Urbanisme et gouvernance), sans se limiter à l'aléa, mais en prenant également en compte les vulnérabilités. (Bergonse et al. 2021 ; Chuvieco et al. 2023 ; Cillis et al. 2022 ; Vasilakos et al. 2007) (voir Chap. 3, Vulnérabilité).

5. À retenir

- La **végétation** est combustible : c'est le point essentiel de l'aléa incendie. L'énergie disponible dépend de la quantité d'eau à évaporer (teneur en humidité) et de la charge en combustible. Sa compacité (herbes, branches, troncs) détermine la vitesse de combustion et l'inflammabilité. L'occurrence d'un incendie suppose la combinaison d'une source d'allumage, de combustibles connectés, de déficit hydrique (sécheresse) et des conditions météorologiques favorables à la propagation.
- Une très faible part des événements concentre la grande majorité des conséquences. La littérature les qualifie d'**événements extrêmes** en raison de cette rareté statistique. L'aléa incendie de végétation peut être ainsi considéré comme un système à dépassement de seuils. Les évènements climatiques extrêmes conjoints combinant sécheresses persistantes et vagues de chaleur sont propices à ce dépassement de seuils et au développement d'évènements extrêmes d'incendie. Les **sécheresses** sont ainsi considérées

comme un phénomène hydrométéorologique affectant durablement l'état des combustibles à l'origine des saisons de feux les plus sévères et de l'extension des incendies hors de la zone méditerranéenne historique.

- Les **évènements extrêmes d'incendie** sont sujets à de fortes vitesses de propagation, intensités et hauteurs de flammes, dominés par les interactions entre le feu et la météorologie et associés à des feux de cime, à des sautes de feu et à de la pyroconvection. Les **sautes de feu** sont particulièrement problématiques au niveau des interfaces ville — espace naturel, car elles peuvent favoriser la pénétration des feux au sein des zones urbanisées et l'éclosion de nouveaux feux aux abords des habitations et infrastructures.

- En Europe, une large part des incendies est d'**origine humaine**, dont une grande majorité relève de la négligence. L'aléa est donc très fortement lié aux concentrations de population, aux activités socio-économiques et aux infrastructures urbaines ou périurbaines. En ce sens, l'incendie de végétation peut être considéré comme un phénomène autant urbain que rural. En France, en moyenne, les deux tiers des incendies éclosent aux interfaces ville — espace naturel.

- L'aléa incendie s'exprime à travers des **régimes de feu**, c'est-à-dire l'ensemble des caractéristiques spatio-temporelles (fréquence des feux, saisonnalité, taille, intensité et sévérité) qui décrivent l'activité incendie dans un territoire au cours d'une période suffisamment longue pour intégrer la variabilité climatique et écologique. Ce concept de régime de feu permet de dépasser une approche évènementielle de l'incendie pour considérer le feu comme un processus structurant des socio-écosystèmes.

- Les incendies résultent de **facteurs à la fois biophysiques et anthropiques**. Les dynamiques socio-économiques — déprise agricole, exode rural, expansion urbaine — expliquent une grande partie des évolutions récentes des régimes d'incendie en favorisant localement l'accumulation des combustibles (notamment pour la végétation basse) et l'extension des interfaces. Le changement climatique agit comme un facteur d'amplification des incendies en renforçant sécheresses et conditions météorologiques propices aux incendies.

- Cette **végétation basse**, composée en grande partie d'arbustes et d'arbrisseaux, de type garrigue et maquis en région méditerranéenne, est impliquée dans de nombreux incendies et en particulier dans les grands feux. Elle s'est développée sous l'effet de la déprise agricole et est associée à des temps de retour courts des incendies, ce qui suggère un risque d'expansion de la garrigue au détriment des zones forestières par exemple.

- Les **zones périurbaines ou à l'urbanisation diffuse** sont particulièrement propices aux départs de feu, car elles concentrent simultanément une forte fréquentation humaine, de nombreuses infrastructures susceptibles d'être à l'origine d'allumages et une végétation souvent abondante et continue.

- L'**indice forêt-météo** constitue une base opérationnelle robuste pour la caractérisation du danger incendie en France. Son intégration dans une démarche plus globale et multifactorielle, incluant la structure et l'état des combustibles, les conditions de vent extrême et les facteurs anthropiques, permettrait de mieux appréhender l'aléa incendie dans toute sa complexité et aux différentes échelles de décision, d'autant plus que la relation feu-météorologie pourrait évoluer sous l'effet du changement climatique.

6. Liste de références du chapitre II

Abatzoglou, John T., A. Park Williams, et Renaud Barbero. 2019. « Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices ». *Geophysical Research Letters*. doi : 10.1029/2018gl080959.

Abdollahi, Abolfazl, et Marta Yebra. 2025. « Challenges and Opportunities in Remote Sensing-Based Fuel Load Estimation for Wildfire Behavior and Management: A Comprehensive Review ». *Remote Sensing* 17(3) : 415-415. doi : 10.3390/rs17030415.

Ager, Alan A., Haiganoush K. Preisler, Bachisio Arca, Donatella Spano, et Michele Salis. 2014. « Wildfire risk estimation in the Mediterranean area ». *Environmetrics*. doi : 10.1002/env.2269.

Aguado, I., E. Chuvieco, R. Borén, et H. Nieto. 2007. « Estimation of Dead Fuel Moisture Content from Meteorological Data in Mediterranean Areas. Applications in Fire Danger Assessment ». *International Journal of Wildland Fire* 16(4):390-97. doi : 10.1071/WF06136.

Alcasena, Fermín J., Michele Salis, Alan A. Ager, Bachisio Arca, Domingo Molina, et Donatella Spano. 2015. « Assessing Landscape Scale Wildfire Exposure for Highly Valued Resources in a Mediterranean Area ». *Environmental Management*. doi : 10.1007/s00267-015-0448-6.

Alcasena, Fermín J., Michele Salis, et Cristina Vega-García. 2016. « A fire modeling approach to assess wildfire exposure of valued resources in central Navarra, Spain ». *European Journal of Forest Research*. doi : 10.1007/s10342-015-0919-6.

Allaire, Frédéric, Jean-Baptiste Filippi, Vivien Mallet, et Florence Vaysse. 2022. « Simulation-Based High-Resolution Fire Danger Mapping Using Deep Learning ». *International Journal of Wildland Fire* 31(4) : 379-94. doi : 10.1071/WF21143.

Alló, M., et M. L. Loureiro. 2020. « Assessing Preferences for Wildfire Prevention Policies in Spain ». *Forest Policy and Economics* 115:102145. doi : 10.1016/j.forpol.2020.102145.

Aragoneses, Elena, Mariano García, Michele Salis, Luís M. Ribeiro, et Emilio Chuvieco. 2023. « Classification and Mapping of European Fuels Using a Hierarchical, Multipurpose Fuel Classification System ». *Earth System Science Data* 15(3) : 1287-1315. doi : 10.5194/essd-15-1287-2023.

Artés, Tomàs, Marc Castellnou, Tracy Houston Durrant, et Jesús San-Miguel. 2022. « Wildfire—Atmosphere Interaction Index for Extreme Fire Behaviour ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22(2) : 509-22. doi : 10.5194/nhess-22-509-2022.

Athanasiou, Miltiadis, Athanasios Karadimitris, Gavriil Xanthopoulos, et Evangelia V. Avramidou. 2025. « Accidents and Incidents Related to Eruptive Fire Behavior in Greece ». *Fire* 8(2) : 58-58. doi : 10.3390/fire8020058.

Babrauskas, Vytenis. 2024. « Electricity-Caused Wildland Fires: Costs, Social Fairness, and Proposed Solution ». *Fire* 7(12):442. doi : 10.3390/fire7120442.

Bajocco, Sofia, et Carlo Ricotta. 2008. « Evidence of selective burning in Sardinia (Italy): which land-cover classes do wildfires prefer? » *Landscape Ecology*. doi : 10.1007/s10980-007-9176-5.

Balch, Jennifer K., John T. Abatzoglou, Maxwell B. Joseph, Michael J. Koontz, Adam L. Mahood, Joe McGlinchy, Megan E. Cattau, et A. Park Williams. 2022. « Warming weakens the night-time barrier to global fire ». *Nature*. doi : 10.1038/s41586-021-04325-1.

Barbero, Renaud, Thomas Curt, Anne Ganteaume, Eric Maillé, Marielle Jappiot, et Adeline Bellet. 2019. « Simulating the effects of weather and climate on large wildfires in France ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-19-441-2019.

Bartlett, Anthony. 2012. « Fire management strategies for' Pinus radiata' plantations near urban areas ». *Australian Forestry*. doi : 10.1080/00049158.2012.10676384.

Battesti, A. 1997. « Vulcain ou l'histoire d'une tentative pour commencer à changer les choses dans le système » Feux de Forêts », par la transparence et la convivialité ». *Forêt Méditerranéenne* XVIII (2) : 143-45.

Bedia, Joaquín, Nicola Golding, Ana Casanueva, Maialen Iturbide, Carlo Buontempo, et José Manuel Gutiérrez. 2017. « Seasonal predictions of Fire Weather Index: Paving the way for their operational applicability in Mediterranean Europe ». *Climate Services*. doi : 10.1016/j.cliser.2017.04.001.

Bedia, Joaquín, Sixto Herrera, et José Manuel Gutiérrez. 2014. « Assessing the predictability of fire occurrence and area burned across phytoclimatic regions in Spain ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-14-53-2014.

Behm, Anna L., Mary L. Duryea, Alan J. Long, et Wayne C. Zipperer. 2004. « Flammability of native understory species in pine flatwood and hardwood hammock ecosystems and implications for the wildland—urban interface ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf03075.

Beltrán-Marcos, David, Susana Suárez-Seoane, José Manuel Fernández-Guisuraga, João Azevedo, et Leonor Calvo. 2024. « Fire Regime Attributes Shape Pre-Fire Vegetation Characteristics Controlling Extreme Fire Behavior under Different Bioregions in Spain ». *Fire Ecology* 20(1). doi : 10.1186/s42408-024-00276-w.

Bento-Gonçalves, António, et António Vieira. 2020. « Wildfires in the wildland-urban interface: Key concepts and evaluation methodologies. » *Science of The Total Environment*. doi : 10.1016/j.scitotenv.2019.135592.

Bergonse, Rafaello, Sandra Oliveira, Ana Gonçalves, Sílvia A. Nunes, Carlos C. DaCamara, et José Luís Zêzere. 2021. « A combined structural and seasonal approach to assess wildfire susceptibility and hazard in summertime ». *Natural Hazards*. doi : 10.1007/s11069-021-04554-7.

Bistinas, Ioannis, Sandy P. Harrison, Iain Colin Prentice, et José M. C. Pereira. 2014. « Causal relationships versus emergent patterns in the global controls of fire frequency ». *Biogeosciences*. doi : 10.5194/bg— 11-5087-2014.

Bowman, David M. J. S., Crystal A. Kolden, John T. Abatzoglou, Fay H. Johnston, Guido R. van der Werf, et Mike D. Flannigan. 2020. « Vegetation fires in the Anthropocene ». *Nature Reviews Earth & Environment*. doi : 10.1038/s43017-020-0085-3.

Bowman, David M. J. S., Grant J. Williamson, John T. Abatzoglou, Crystal A. Kolden, Mark A. Cochrane, et Alistair M. S. Smith. 2017. « Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. » *David M. J. S. Bowman, David M. J. S. Bowman, Grant J. Williamson, Grant J. Williamson, John T. Abatzoglou, John T. Abatzoglou, Crystal A. Kolden, et al. « Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. » Nature Ecology and Evolution, 2017. https://doi.org/10.1038/s41559-016-0058.* doi : 10.1038/s41559-016-0058.

Brown, David P., et Lucija Muehlenbachs. 2024. « The Value of Electricity Reliability: Evidence from Battery Adoption ». *Journal of Public Economics* 239:105216. doi : 10.1016/j.jpubeco.2024.105216.

Calviño-Cancela, María, María Luisa Chas Amil, Eduardo D. García-Martínez, et Julia Touza. 2016. « Wildfire risk associated with different vegetation types within and outside wildland-urban interfaces ». *Forest Ecology and Management*. doi : 10.1016/j.foreco.2016.04.002.

Cappelluti, Onofrio, Mario Elia, et Giovanni Sanesi. 2024. « Could Different Structural Features Affect Flammability Traits in Mediterranean Forest Ecosystems? » *Trees* 38(3) : 753-65. doi : 10.1007/s00468-024-02513-w.

Cardil, Adrián, Adrián Jiménez-Ruano, Santiago Monedero, Phillip SeLegue, Macarena Ortega, Raúl Quilez, Jeff Fuentes, Geoff Marshall, Robert Clark, Tim Chavez, Sergio de-Miguel, Tomás Quiñones, Fernando Bezares,

Scott Purdy, Kristen Allison, Tim Metzger, Chris Waters, Midhun Mohan, et Joaquín Ramirez. 2025. « Assessing the Suppression Difficulty of Wildland Fires for Initial Attack Response ». *International Journal of Wildland Fire* 34(12) : WF24160. doi : 10.1071/WF24160.

Carlucci, Margherita, Ilaria Zambon, Andrea Colantoni, et Luca Salvati. 2019. « Socioeconomic Development, Demographic Dynamics and Forest Fires in Italy, 1961—2017: A Time-Series Analysis ». *Sustainability*. doi : 10.3390/su11051305.

Castel-Clavera, Jorge, François Pimont, Thomas Opitz, Julien Ruffault, Renaud Barbero, Denis Allard, et Jean-Luc Dupuy. 2025. « A Comparative Analysis of Fire-Weather Indices for Enhanced Fire Activity Prediction with Probabilistic Approaches ». *Agricultural and Forest Meteorology* 361:110315. doi : 10.1016/j.agrformet.2024.110315.

Castellnou, Marc, Mercedes Bachfischer, Marta Miralles, Borja Ruiz, Cathelijne R. Stoof, et Jordi Vilà-Guerau De Arellano. 2022. « Pyroconvection Classification Based on Atmospheric Vertical Profiling Correlation With Extreme Fire Spread Observations ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127(22) : e2022JD036920. doi : 10.1029/2022JD036920.

Catry, Filipe X., Francisco Rego, Fernando Bação, et Francisco Moreira. 2009. « Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf07123.

Chappaz, François, et Anne Ganteaume. 2023. « Role of Land-cover and WUI Types on Spatio-temporal Dynamics of Fires in the French Mediterranean Area ». *Risk Analysis* 43(5) : 1032-57. doi : 10.1111/risa.13979.

Chuvieco, Emilio, M. Lucrecia Pettinari, Nikos Koutsias, Matthias Forkel, Stijn Hantson, et Marco Turco. 2021. « Human and climate drivers of global biomass burning variability. » *Science of The Total Environment*. doi : 10.1016/j.scitotenv.2021.146361.

Chuvieco, Emilio, Marta Yebra, Simone Martino, Kirsten Thonicke, Marta Gómez Giménez, Jesús F. San-Miguel, Duarte Oom, Ramona Velea, Florent Mouillot, Juan Ramón Molina, Ana Isabel Miranda, Diogo Lopes, Michele Salis, Marin Bugarić, M. Sofiev, Evgeny Kadantsev, Ioannis Z. Gitas, Dimitris G. Stavrakoudis, George Eftychidis, Avi Bar-Massada, Alex Neidermeier, Valerio Pampanoni, M. Lucrecia Pettinari, Fátima Arrogante-Funes, Carmen Ochoa, Bruno César de Melo Moreira, et Domingos X. Viegas. 2023. « Towards an Integrated Approach to Wildfire Risk Assessment: When, Where, What and How May the Landscapes Burn ». *Fire*. doi : 10.3390/fire6050215.

Cillis, G., A. Lanorte, G. Nolè, V. Santarsiero, et Francesco Vito Ronco. 2022. « FIRE PLANNING OF URBAN-RURAL INTERFACE IN OPEN SOURCE GIS ENVIRONMENT : CASE STUDY OF THE APULIA REGION (SOUTHERN ITALY) ». *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. doi : 10.5194/isprs-archives-xlviii -4— w 1-2022-97-2022.

Corona, Piermaria, Aitor Ameztegui, Barbara Ferrari, Rosaria Cartisano, et Anna Barbati. 2014. « Calibration assessment of forest flammability potential in Italy ». *Iforest - Biogeosciences and Forestry*. doi : 10.3832/ifor1123-007.

Costa, Luís, Kirsten Thonicke, Benjamin Poulter, et Franz-W. Badeck. 2011. « Sensitivity of Portuguese forest fires to climatic, human, and landscape variables: subnational differences between fire drivers in extreme fire years and decadal averages ». *Regional Environmental Change*. doi : 10.1007/s10113-010-0169-6.

Curt, Thomas, Laurent Borgniet, et Christophe Bouillon. 2013. « Wildfire frequency varies with the size and shape of fuel types in southeastern France: implications for environmental management. » *Journal of Environmental Management*. doi : 10.1016/j.jenvman.2012.12.006.

Curt, Thomas, Thibaut Fréjaville, et Sébastien Lahaye. 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*. doi : 10.1071/wf15205.

Delforge, Damien, Valentin Wathelet, Regina Below, Cinzia Lanfredi Sofia, Margo Tonnelier, Joris A. F. Van Loenhout, et Niko Speybroeck. 2025. « EM-DAT : The Emergency Events Database ». *International Journal of Disaster Risk Reduction* 124:105509. doi : 10.1016/j.ijdrr.2025.105509.

Di Giuseppe, Francesca, Joe McNorton, Anna Lombardi, et Fredrik Wetterhall. 2025. « Global Data-Driven Prediction of Fire Activity ». *Nature Communications* 16(1) : 2918. doi : 10.1038/s41467-025-58097-7.

Di Giuseppe, Francesca, Florian Pappenberger, Fredrik Wetterhall, Blazej Krzeminski, Andrea Camia, Giorgio Libertá, et Jesus San Miguel. 2016. « The Potential Predictability of Fire Danger Provided by Numerical Weather Prediction ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 55(11) : 2469-91. doi : 10.1175/JAMC-D-15-0297.1.

Dimitrakopoulos, A. P., A. M. Bemmerzouk, et Ioannis Mitsopoulos. 2011. « Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment ». *Meteorological Applications*. doi : 10.1002/met.214.

Dimitrakopoulos, A. P., Carolina Gogi, G. Stamatelos, Georgios Stamatelos, et Ioannis Mitsopoulos. 2011. « Statistical analysis of the fire environment of large forest fires (>1000 ha) in Greece ». *Polish Journal of Environmental Studies*.

Duane, Andrea, Marc Castellnou, et Lluís Brotóns. 2021. « Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events ». *Climatic Change*. doi : 10.1007/s10584-021-03066-4.

Duane, Andrea, Aymen Moghli, Lluís Coll, et Cristina Vega. 2025. « On the Evidence of Contextually Large Fires in Europe Based on Return Period Functions ». *Applied Geography* 176:103539. doi : 10.1016/j.apgeog.2025.103539.

Duff, Thomas J., Tina L. Bell, et Alan York. 2013. « Predicting continuous variation in forest fuel load using biophysical models: a case study in south-eastern Australia ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf11087.

Duguy, Beatriz, José Antonio Alloza, Achim Röder, V. Ramón Vallejo, et Juan Francisco Pastor. 2007. « Modelling the effects of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour in a Mediterranean landscape (eastern Spain) ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf06101.

Dupire, Sylvain, Thomas Curt, et Sylvain Bigot. 2017. « Spatio-temporal Trends in Fire Weather in the French Alps ». *Science of The Total Environment*. doi : 10.1016/j.scitotenv.2017.04.027.

European Commission, Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. 2013. *Harmonized Classification Scheme of Fire Causes in the EU Adopted for the European Fire Database of EFFIS*. LU : Publications Office.

Evin, Guillaume, Thomas Curt, et Nicolas Eckert. 2018. « Has Fire Policy Decreased the Return Period of the Largest Wildfire Events in France? A Bayesian Assessment Based on Extreme Value Theory ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18(10) : 2641-51. doi : 10.5194/nhess-18-2641-2018.

Ezz, Ahmad Abo El, Jean Boucher, Anne Cotton-Gagnon, et Alexandre Godbout. 2022. « Framework for spatial incident-level wildfire risk modelling to residential structures at the wildland urban interface ». *Fire Safety Journal*. doi : 10.1016/j.firesaf.2022.103625.

Fargeon, Hélène, François Pimont, Nicolas Martin-StPaul, Miquel De Cáceres, Julien Ruffault, Renaud Barbero, et Jean-Luc Dupuy. 2020. « Projections of fire danger under climate change over France: where do the greatest uncertainties lie? » *Climatic Change*. doi : 10.1007/s10584-019-02629-w.

Fernandes, Paulo M. 2010. « Creating fire-smart forests and landscapes ». *Forêt Méditerranéenne*. doi : 10.1038/npre.2011.6245.

Fernandes, Paulo M., Ana M. G. Barros, Anita Pinto, et João A. C. Santos. 2016. « Characteristics and controls of extremely large wildfires in the western Mediterranean Basin ». *Journal of Geophysical Research*. doi : 10.1002/2016jg003389.

Fernandes, Paulo M., Carlos Loureiro, Nuno Guiomar, Gianni Boris Pezzatti, Filipa Torres-Manso, et Luis Filipe Gomes Lopes. 2014. « The dynamics and drivers of fuel and fire in the Portuguese public forest ». *Journal of Environmental Management*. doi : 10.1016/j.jenvman.2014.07.049.

Fernandes, Paulo M., Tiago Monteiro-Henriques, Nuno Guiomar, Carlos Loureiro, et Ana M. G. Barros. 2016. « Bottom-Up Variables Govern Large-Fire Size in Portugal ». *Ecosystems*. doi : 10.1007/s10021-016-0010-2.

Fernández-Guisuraga, José Manuel, et Leonor Calvo. 2023. « Fuel Build-up Promotes an Increase in Fire Severity of Reburned Areas in Fire-Prone Ecosystems of the Western Mediterranean Basin ». *Fire Ecology* 19(1). doi : 10.1186/s42408-023-00232-0.

Ferreira-Leite, Flora, Nuno Ganho, António Bento-Gonçalves, Maria Filomena Botelho, et Filipe Botelho. 2017. « Iberian atmospheric dynamics and large forest fires in mainland Portugal ». *Agricultural and Forest Meteorology*. doi : 10.1016/j.agrformet.2017.08.033.

Finney, Mark A. 2005. « The Challenge of Quantitative Risk Analysis for Wildland Fire ». *Forest Ecology and Management* 211(1-2):97-108. doi : 10.1016/j.foreco.2005.02.010.

Finney, Mark A., Isaac C. Grenfell, Charles W. McHugh, Robert C. Seli, Diane Trethewey, Richard D. Stratton, et Stuart Brittain. 2011. « A Method for Ensemble Wildland Fire Simulation ». *Environmental Modeling & Assessment*. doi : 10.1007/s10666-010-9241-3.

Finney, Mark A., et Sara McAllister. 2011. « A Review of Fire Interactions and Mass Fires ». *Journal of Combustion*. doi : 10.1155/2011/548328.

Finney, Mark A., Sara S. McAllister, Torben P. Grumstrup, et Jason M. Forthofer. 2021. *Wildland Fire Behaviour: Dynamics, Principles and Processes*. CSIRO Publishing. Clayton South, VIC: CSIRO Publishing.

Finney, Mark A., Charles W. McHugh, Isaac C. Grenfell, Karin L. Riley, et Karen C. Short. 2011. « A simulation of probabilistic wildfire risk components for the continental United States ». *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. doi : 10.1007/s00477-011-0462-z.

Fréjaville, Thibaut, Thomas Curt, et Christopher Carcaillet. 2016. « Tree Cover and Seasonal Precipitation Drive Understorey Flammability in Alpine Mountain Forests ». *Journal of Biogeography* 43(9) : 1869-80. doi : 10.1111/jbi.12745.

Fujioka, Francis M., A. Malcolm Gill, Domingos X. Viegas, et B. Mike Wotton. 2009. « Fire danger and fire behavior modeling systems in Australia, Europe, and North America ». *Developments in environmental science*. doi : 10.1016/s1474-8177(08)00021-1.

Ganteaume, Anne, et Renaud Barbero. 2019. « Contrasting large fire activity in the French Mediterranean ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-19-1055-2019.

Ganteaume, Anne, Renaud Barbero, Marielle Jappiot, et Eric Maillé. 2021. « Understanding Future Changes to Fires in Southern Europe and Their Impacts on the Wildland-Urban Interface ». *Journal of Safety Science and Resilience* 2(1) : 20-29. doi : 10.1016/j.jnlssr.2021.01.001.

Ganteaume, Anne, Andrea Camia, Marielle Jappiot, Jesús San-Miguel-Ayanz, Marlène Long-Fournel, et Corinne Lampin. 2013. « A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe ». *Environmental Management* 51(3) : 651-62. doi : 10.1007/s00267-012-9961-z.

Ganteaume, Anne, et Marielle Jappiot. 2013. « What causes large fires in Southern France ». *Forest Ecology and Management*. doi : 10.1016/j.foreco.2012.06.055.

Ganteaume, Anne, et M. Long-Fournel. 2015. « Driving factors of fire density can spatially vary at the local scale in south-eastern France ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf13209.

Gelabert, Pere, Adrián Jiménez-Ruano, Jaime Ribalaygua, Luís Torres, et Marcos Rodrigues. 2025. « Human-Caused Ignition Pathways under Climate Change Scenarios in Eastern Spain ». *Geomatics Natural Hazards and Risk* 16(1). doi : 10.1080/19475705.2025.2472864.

Ghasemiazma, Farzad, Marj Tonini, Paolo Fiorucci, et Marco Turco. 2026. « Megafires in Mediterranean Europe: The Compound Role of Fire Weather and Drought ». *Npj Natural Hazards* 3(1) : 33. doi : 10.1038/s44304-026-00197-5.

Giannaros, Theodore M., Georgios Papavasileiou, Konstantinos Lagouvardos, Vassiliki Kotroni, Stavros Dafis, Athanasios Karagiannidis, et Eleni Dragozi. 2022. « Meteorological Analysis of the 2021 Extreme Wildfires in Greece: Lessons Learned and Implications for Early Warning of the Potential for Pyroconvection ». *Atmosphere*. doi : 10.3390/atmos13030475.

Gjedrem, Anna Marie, et Maria Monika Metallinou. 2023. « Wildland-Urban Interface Fires in Norwegian Coastal Heathlands — Identifying Risk Reducing Measures ». *Safety Science* 159:106032. doi : 10.1016/j.ssci.2022.106032.

González-Olabarría, José Ramón, Lluís Brotons, David Gritten, Antoni Tudela, et José Angel Teres. 2012. « Identifying location and causality of fire ignition hotspots in a Mediterranean region ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf11039.

Goss, Michael, Daniel L. Swain, John T. Abatzoglou, Ali Sarhadi, Crystal A. Kolden, A. Park Williams, et Noah S. Diffenbaugh. 2020. « Climate change is increasing the likelihood of extreme autumn wildfire conditions across California ». *Environmental Research Letters*. doi : 10.1088/1748-9326/ab83a7.

Hantson, Stijn, Salvador Pueyo, et Emilio Chuvieco. 2016. « Global Fire Size Distribution : From Power Law to Log-Normal ». *International Journal of Wildland Fire* 25(4) : 403-12. doi : 10.1071/WF15108.

Hardy, Colin C. 2005. « Wildland Fire Hazard and Risk: Problems, Definitions, and Context ». *Forest Ecology and Management* 211 (1-2) : 73-82. doi : 10.1016/j.foreco.2005.01.029.

Iglesias, Virginia, Jennifer K. Balch, et William R. Travis. 2022. « U.S. Fires Became Larger, More Frequent, and More Widespread in the 2000s ». *Science Advances* 8(11) : eabc0020. doi : 10.1126/sciadv.abc0020.

Jiménez-Ruano, Adrián, Marcos Rodrigues Mimbrero, Fermín Alcasena, Johan Sjöström, Christopher Marrs, Luís Mário Ribeiro, Palaiologos Palaiologou, Emilio Chuvieco, Pere Gelabert, et Cristina Vega-García. 2023. « Assessing Human-Caused Wildfire Ignition Likelihood across Europe ». *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)* 1-6. doi : 10.23919/splitech58164.2023.10193249.

Jolly, W., Patrick Freeborn, Wesley Page, et Bret Butler. 2019. « Severe Fire Danger Index: A Forecastable Metric to Inform Firefighter and Community Wildfire Risk Management ». *Fire* 2(3) : 47. doi : 10.3390/fire2030047.

Jolly, W. Matt, et Daniel M. Johnson. 2018. « Pyro-Ecophysiology: Shifting the Paradigm of Live Wildland Fuel Research ». *Fire* 1(1) : 8. doi : 10.3390/fire1010008.

Kontoes, Charalampos, Iphigenia Keramitsoglou, Ioannis Papoutsis, Nicolas I. Sifakis, et Panteleimon Xofis. 2013. « National Scale Operational Mapping of Burnt Areas as a Tool for the Better Understanding of Contemporary Wildfire Patterns and Regimes ». *Sensors*. doi : 10.3390/s130811146.

Koutsias, Nikos, Margarita Arianoutsou, Athanasios S. Kallimanis, Giorgos Mallinis, John M. Halley, et Panayotis Dimopoulos. 2012. « Where Did the Fires Burn in Peloponnisos, Greece the Summer of 2007? Evidence for a Synergy of Fuel and Weather ». *Agricultural and Forest Meteorology* 156:41-53. doi : 10.1016/j.agrformet.2011.12.006.

Kustov, Maksym, Oleg Fedoryaka, Viacheslav Kononovych, Batyr Khalmuradov, Pavlo Borodych, Tymur Kurtseitov, Anatolii Nikitin, Valentyn Romaniuk, Иван Мещеряков, et Julia Veretennikova. 2023. « Level of Fire Danger of the Local Territory ». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2 (10 [122]) : 31-38. doi : 10.15587/1729-4061.2023.276653.

Lahaye, Sébastien, Thomas Curt, Thibaut Fréjaville, Jason J. Sharples, Laure Paradis, et Christelle Hély. 2018. « What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf17087.

Lampin-Maillet, Corinne, M. Long-Fournel, Anne Ganteaume, Marielle Jappiot, et Jean-Paul Ferrier. 2011. « Land cover analysis in wildland—urban interfaces according to wildfire risk: A case study in the South of France ». *Forest Ecology and Management*. doi : 10.1016/j.foreco.2010.11.022.

Lanet, Marine, Laurent Li, Antoine Ehret, Solène Turquety, et Hervé Le Treut. 2024. « Attribution of Summer 2022 Extreme Wildfire Season in Southwest France to Anthropogenic Climate Change ». *Npj Climate and Atmospheric Science* 7(1) : 267. doi : 10.1038/s41612-024-00821-z.

Leone, Vittorio, Raffaella Lovreglio, M. Pilar Martín, J. Julio Camarero, Jesús I. Martínez, et Lara Vilar. 2009. « Human Factors of Fire Occurrence in the Mediterranean ». *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. doi : 10.1007/978-3-642-01754-4_11.

Li, Shu, et Tirtha Banerjee. 2021. « Spatial and Temporal Pattern of Wildfires in California from 2000 to 2019 ». *Scientific Reports* 11(1) : 8779. doi : 10.1038/s41598-021-88131-9.

Lin, Hong-Ting Victor, Hsiao-Wen Lin, Jessica L. McCarty, Dongdong Wang, Brendan M. Rogers, Douglas C. Morton, G. James Collatz, Yufang Jin, et James T. Randerson. 2014. « Management and climate contributions to satellite-derived active fire trends in the contiguous United States ». *Journal of Geophysical Research*. doi : 10.1002/2013jg002382.

Malamud, Bruce D., Gleb Morein, et Donald L. Turcotte. 1998. « Forest Fires : An Example of Self-Organized Critical Behavior ». *Science* 281(5384) : 1840-42. doi : 10.1126/science.281.5384.1840.

Marcos-Matamoros, Raül, Marco Turco, Joaquín Bedia, Maria Carmen Llasat, et Antonello Provenzale. 2015. « Seasonal predictability of summer fires in a Mediterranean environment ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf15079.

Marques, Susete, José G. Borges, Jordi García-Gonzalo, Francisco Moreira, João M. B. Carreiras, Manuela M. Oliveira, Ana Cantarinha, Brigite Botequim, et José M. C. Pereira. 2011. « Characterization of wildfires in Portugal ». *European Journal of Forest Research*. doi : 10.1007/s10342-010-0470-4.

Martins, Bruno, Catarina Pinheiro, Carlos Hermenegildo, Adélia Nunes, António Bento-Gonçalves, et Manuela Laranjeira. 2025. « A Multi-Hazard Map-Based Wildfires and Gully Erosion in a Mediterranean Mountain Environment ». *Natural Hazards*. doi : 10.1007/s11069-025-07399-6.

Martin-StPaul, N., F. Pimont, J. L. Dupuy, E. Rigolot, J. Ruffault, H. Fargeon, E. Cabane, Y. Duché, R. Savazzi, et M. Toutchkov. 2018. « Live Fuel Moisture Content (LFMC) Time Series for Multiple Sites and Species in the French Mediterranean Area since 1996 ». *Annals of Forest Science* 75(2) : 57. doi : 10.1007/s13595-018-0729-3.

Mercer, D. Evan, et Wayne C. Zipperer. 2012. « Fire in the Wildland—Urban Interface ». *Urban-Rural Interfaces*. doi : 10.2136/2012.urban-rural.c 16.

Miesel, Jessica R., M. Jaime Baeza, Martín de Luis, José Raventós, et A. Escarré. 2002. « Factors influencing fire behaviour in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk. » *Journal of Environmental Management*. doi : 10.1006/jema.2002.0545.

Molina, Cristina Montiel, et Luis Galiana-Martín. 2016. « Fire Scenarios in Spain: A Territorial Approach to Proactive Fire Management in the Context of Global Change ». *Forests*. doi : 10.3390/f7110273.

Moreira, Francisco, Davide Ascoli, Hugh Safford, Mark A. Adams, José M. Moreno, José M. C. Pereira, Filipe X. Catry, Juan Armesto, William Bond, Mauro E. González, Thomas Curt, Nikos Koutsias, Lachlan McCaw, Owen Price, Juli G. Pausas, Eric Rigolot, Scott Stephens, Cagatay Tavsanoglu, V. Ramon Vallejo, Brian W. Van Wilgen, Gavriil Xanthopoulos, et Paulo M. Fernandes. 2020. « Wildfire management in Mediterranean-type regions: paradigm change needed ». *Environmental Research Letters* 15(1) : 011001. doi : 10.1088/1748-9326/ab541e.

Moreira, Francisco, Filipe X. Catry, Francisco Rego, et Fernando Bação. 2010. « Size-dependent pattern of wildfire ignitions in Portugal: when do ignitions turn into big fires? » *Landscape Ecology*. doi : 10.1007/s10980-010-9491-0.

Moreira, Francisco, Francisco Rego, et Paulo G. Ferreira. 2001. « Temporal (1958-1995) pattern of change in a cultural landscape of northwestern Portugal: implications for fire occurrence ». *Landscape Ecology*. doi : 10.1023/a:1013130528470.

Moreira, Francisco, Olga Viedma, Margarita Arianoutsou, Thomas Curt, Nikos Koutsias, Eric Rigolot, Anna Barbati, Piermaria Corona, Pedro Vaz, Gavriil Xanthopoulos, Florent Mouillot, et Ertugrul Bilgili. 2011. « Landscape — Wildfire Interactions in Southern Europe: Implications for Landscape Management ». *Journal of Environmental Management* 92(10) : 2389-2402. doi : 10.1016/j.jenvman.2011.06.028.

Moreno, José M., Olga Viedma, Gonzalo Zavala, et Belén Luna. 2011. « Landscape variables influencing forest fires in central Spain ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf10005.

Murray, Alan T., Jiwon Baik, Vanessa Echeverri Figueroa, Darlene Rini, Max A. Moritz, Dar A. Roberts, Stuart H. Sweeney, Leila M. V. Carvalho, et Charles Jones. 2023. « Developing Effective Wildfire Risk Mitigation Plans for the Wildland Urban Interface ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 124:103531. doi : 10.1016/j.jag.2023.103531.

Neidermeier, Alex, Cecilia Zagaria, Valerio Pampanoni, Thales A. P. West, et Peter H. Verburg. 2023. « Mapping Opportunities for the Use of Land Management Strategies to Address Fire Risk in Europe ». *Journal of Environmental Management* 346:118941- 118941. doi : 10.1016/j.jenvman.2023.118941.

Nezval, Vojtěch, Richard Andrášik, et Michal Bíl. 2022. « Vegetation Fires along the Czech Rail Network ». *Fire Ecology* 18(1) : 15. doi : 10.1186/s42408-022-00141-8.

Oliveira, Sandra, Friderike Oehler, Jesús San-Miguel-Ayanz, Andrea Camia, et José M. C. Pereira. 2012. « Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest ». *Forest Ecology and Management*. doi : 10.1016/j.foreco.2012.03.003.

Pandey, Pooja, Gabriela Huidobro, Luis Filipe Lopes, Anne Ganteaume, Davide Ascoli, Conceição Colaco, Gavriil Xanthopoulos, Theodore M. Giannaros, Rob Gazzard, Georgios Boustras, Toddi Steelman, Valerie Charlton, Euan Ferguson, Judith Kirschner, Kerryn Little, Cathelijne Stoof, William Nikolakis, Carmen Rodriguez Fernández-Blanco, Claudio Ribotta, Hugo Lambrechts, Mariña Fernandez, et Simona Dossi. 2023. « A Global Outlook on Increasing Wildfire Risk: Current Policy Situation and Future Pathways ». *Trees, Forests and People* 14:100431. doi : 10.1016/j.tfp.2023.100431.

Parisien, Marc-André, Denyse A. Dawe, Carol Miller, Christopher A. Stockdale, et O. Bradley. Armitage. 2019. « Applications of simulation-based burn probability modelling: a review ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf19069.

Parisien, Marc-André, Carol Miller, Sean A. Parks, Evan R. DeLancey, Louise Gallagher, François Robinne, François-Nicolas Robinne, et Mike D. Flannigan. 2016. « The spatially varying influence of humans on fire probability in North America ». *Environmental Research Letters*. doi : 10.1088/1748-9326/11/7/075005.

Pausas, Juli G., et Santiago Fernández-Muñoz. 2012. « Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime ». *Climatic Change*. doi : 10.1007/s10584-011-0060-6.

Pausas, Juli G., et Jon E. Keeley. 2014. « Abrupt Climate-Independent Fire Regime Changes ». *Ecosystems*. doi : 10.1007/s10021-014-9773-5.

Pausas, Juli G., et Jon E. Keeley. 2021. « Wildfires and global change ». *Frontiers in Ecology and the Environment*. doi : 10.1002/fee.2359.

Perpinyà, Anna Badia i, et Montserrat Pallarès-Barberà. 2006. « Spatial distribution of ignitions in Mediterranean periurban and rural areas: The case of Catalonia ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf04008.

Perpinyà, Anna Badia i, Pere Serra, et Sirio Modugno. 2011. « Identifying dynamics of fire ignition probabilities in two representative Mediterranean wildland-urban interface areas ». *Applied Geography*. doi : 10.1016/j.apgeog.2011.01.016.

Pimont, François, Héléne Fargeon, Thomas Opitz, Julien Ruffault, Renaud Barbero, Nicolas Martin-StPaul, Eric Rigolot, Miguel RiviÉre, et Jean-Luc Dupuy. 2021. « Prediction of Regional Wildfire Activity in the Probabilistic Bayesian Framework of Firelihood ». *Ecological Applications* 31(5) : e02316. doi : 10.1002/eap.2316.

Planas, Eulàlia, Ronan Paugam, Alba Àgueda, Pascale Vacca, et Elsa Pastor. 2023. « Fires at the Wildland-Industrial Interface. Is There an Emerging Problem? » *Fire Safety Journal* 141:103906. doi : 10.1016/j.firesaf.2023.103906.

Purificação, Carolina, Alice Henkes, Στέργιος Κάρτσιος, et Flavio T. Couto. 2024. « The Role of Atmospheric Circulation in Favouring Forest Fires in the Extreme Southern Portugal ». *Sustainability* 16(16) : 6985-6985. doi : 10.3390/su16166985.

Reed, William J., et Kevin S. McKelvey. 2002. « Power-Law Behaviour and Parametric Models for the Size-Distribution of Forest Fires ». *Ecological Modelling* 150(3) : 239-54. doi : 10.1016/S0304-3800(01)00483-5.

Riccardi, Cynthia L., David V. Sandberg, et Roger D. Ottmar. 2007. « Quantifying physical characteristics of wildland fuels using the Fuel Characteristic Classification System ». *Canadian Journal of Forest Research*. doi : 10.1139/x07-175.

Ricotta, Carlo, Sofia Bajocco, Daniela Guglietta, et Marco Conedera. 2018. « Assessing the Influence of Roads on Fire Ignition: Does Land Cover Matter? » *Fire*. doi : 10.3390/fire1020024.

Ricotta, Carlo, Daniela Guglietta, et Antonello Migliozzi. 2012. « No evidence of increased fire risk due to agricultural land abandonment in Sardinia (Italy) ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-12-1333-2012.

Rodrígues, Marcos, Juan Ramón de la Riva Fernández, et Stewart Fotheringham. 2014. « Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression ». *Applied Geography*. doi : 10.1016/j.apgeog.2014.01.011.

Royé, Dominic, Fantina Tedim, Javier Martín-Vide, Michele Salis, Jordi Vendrell, Raffaella Lovreglio, Christophe Bouillon, et Vittorio Leone. 2020. « Wildfire burnt area patterns and trends in Western Mediterranean Europe via the application of a concentration index ». *Land Degradation & Development*. doi : 10.1002/ldr.3450.

Ruffault, Julien, Thomas Curt, Nicolas K. Martin-StPaul, Vincent Moron, et Ricardo M. Trigo. 2018. « Extreme wildfire events are linked to global-change-type droughts in the northern Mediterranean ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-18-847-2018.

Ruffault, Julien, Thomas Curt, Nicolas K. Martin St-Paul, Vincent Moron, et Ricardo M. Trigo. 2017. « Extreme Wildfire occurrence in response to Global Change type Droughts in the Northern Mediterranean ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-2017-415.

Ruffault, Julien, Vincent Moron, Ricardo M. Trigo, et Thomas Curt. 2017. « Daily synoptic conditions associated with large fire occurrence in Mediterranean France: evidence for a wind-driven fire regime ». *International Journal of Climatology*. doi : 10.1002/joc.4680.

Ruffault, Julien, et Florent Mouillot. 2015. « How a new fire-suppression policy can abruptly reshape the fire-weather relationship ». *Ecosphere*. doi : 10.1890/es15-00182.1.

Ruffault, Julien, et Florent Mouillot. 2017. « Contribution of human and biophysical factors to the spatial distribution of forest fire ignitions and large wildfires in a French Mediterranean region. » *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf16181.

San-Miguel-Ayanz, Jess, Ernst Schulte, Guido Schmuck, Andrea Camia, Peter Strobl, Giorgio Liberta, Cristiano Giovando, Roberto Boca, Fernando Sedano, Pieter Kempeneers, Daniel McInerney, Ceri Withmore, Sandra Santos De Oliveira, Marcos Rodrigues, Tracy Durrant, Paolo Corti, Friderike Oehler, Lara Vilar, et Giuseppe Amatulli. 2012. « Comprehensive Monitoring of Wildfires in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS) ». in *Approaches to Managing Disaster - Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts*, édité par J. Tiefenbacher. InTech.

Santos, Filippe L. M., Flavio T. Couto, Maria Monteiro, Nuno Almeida Ribeiro, Patrick Le Moigne, et Rui Salgado. 2025. « A Hybrid Framework to Estimate Live Fuel Moisture Content through Land Surface Modelling ». *Modeling Earth Systems and Environment* 11(6) : 395. doi : 10.1007/s40808-025-02561-2.

Scarpa, Carla, Mario Elia, Marina D'Este, Michele Salis, Marcos Rodrigues, Bachisio Arca, Pierpaolo Duce, Maria Antonella Francesca Fiori, et Grazia Pellizzaro. 2024. « Modelling Wildfire Activity in Wildland—Urban Interface (WUI) Areas of Sardinia, Italy ». *International Journal of Wildland Fire* 33(12). doi : 10.1071/WF24109.

Schmidt, David A., Alan H. Taylor, et Carl N. Skinner. 2008. « The influence of fuels treatment and landscape arrangement on simulated fire behavior, Southern Cascade range, California ». *Forest Ecology and Management*. doi :10.1016/j.foreco.2008.01.023.

Schug, Franz, Avi Bar-Massada, Amanda R. Carlson, Heather Cox, Todd J. Hawbaker, David Helmers, Patrick Hostert, Dominik Kaim, Neda K. Kasraee, Sebastián Martinuzzi, Miranda H. Mockrin, Kira A. Pfoch, et Volker C. Radeloff. 2023. « The Global Wildland—Urban Interface ». *Nature* 621(7977) : 94-99. doi : 10.1038/s41586-023-06320-0.

Sfetsos, Athanasios, Frederique Giroud, Alice Clemencau, Vassiliki Varela, Catherine Freissinet, Jean LeCroart, Diamando Vlachogiannis, Nadia Politi, Stelios Karozis, Ilias Gkotsis, George Eftychidis, Ralf Hedel, et Stefan Hahmann. 2021. « Assessing the Effects of Forest Fires on Interconnected Critical Infrastructures under Climate Change. Evidence from South France ». *Infrastructures* 6(2) : 16. doi : 10.3390/infrastructures6020016.

Silva, João M. N., Maria Vanesa Moreno, Yannick Le Page, Duarte Oom, Ioannis Bistinas, et José M. C. Pereira. 2019. « Spatiotemporal trends of area burnt in the Iberian Peninsula, 1975—2013 ». *Regional Environmental Change*. doi : 10.1007/s10113-018-1415-6.

Spyratos, Vassilis, Patrick S. Bourgeron, et Michael Ghil. 2007. « Development at the wildland—urban interface and the mitigation of forest-fire risk ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. doi : 10.1073/pnas.0704488104.

Symmank, Lars, Shahriar Mohammadzadeh, et Sonja Szymczak. 2025. « Embankment Fires on Railways—Where and How to Mitigate? » *Infrastructures* 10(12) : 337. doi : 10.3390/infrastructures10120337.

Syphard, Alexandra D., Volker C. Radeloff, Todd J. Hawbaker, et Susan I. Stewart. 2009. « Conservation Threats Due to Human-Caused Increases in Fire Frequency in Mediterranean-Climate Ecosystems ». *Conservation Biology*. doi : 10.1111/j.1523-1739.2009.01223.x.

Syphard, Alexandra D., Timothy H. Sheehan, Heather Rustigian-Romsos, et Kenneth Ferschweiler. 2018. « Mapping future fire probability under climate change: Does vegetation matter? » *PLOS ONE*. doi : 10.1371/journal.pone.0201680.

Tedim, Fantina, Vittorio Leone, Malik Amraoui, Christophe Bouillon, Michael R. Coughlan, Giuseppe M. Delogu, Paulo M. Fernandes, Carmen Ferreira, Sarah McCaffrey, et Tara K. McGee. 2018. « Defining extreme wildfire events: Difficulties, challenges, and impacts ». *Fire* 1(1) : 9. doi : 10.3390/fire1010009.

Terrei, Lucas, Aymeric Lamorlette, et Anne Ganteaume. 2019. « Modelling the fire propagation from the fuel bed to the lower canopy of ornamental species used in wildland—urban interfaces ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf18090.

Thompson, Matthew P., Julie W. Gilbertson-Day, Jill R. Scott, et Joe H. Scott. 2016. « Integrating pixel- and polygon-based approaches to wildfire risk assessment: Application to a high-value watershed on the Pike and San Isabel National Forests, Colorado, USA ». *Environmental Modeling & Assessment*. doi : 10.1007/s10666-015-9469-z.

Tsakaldimi, Marianthi, Petros Ganatsas, Nikolaos Oikonomakis, Elias Kouloukouras, et Thanasis Partozis. 2023. « Vegetation Analysis and Silvicultural Suggestions for Mitigating Fire Danger and Protecting Nature the Case of a Natura 2000 Site in Southern Greece ». *Revista de Gestão Social e Ambiental* 17(9) : e03515-e03515. doi : 10.24857/rgsa.v17n9-019.

Turco, Marco, Joaquín Bedia, Fabrizio Di Liberto, Paolo Fiorucci, Jost von Hardenberg, Nikos Koutsias, Maria Carmen Llasat, Fotios Xystrakis, et Antonello Provenzale. 2016. « Decreasing fires in Mediterranean Europe ». *PLOS ONE*. doi : 10.1371/journal.pone.0150663.

Turco, Marco, Maria Carmen Llasat, A. Tudela, Xavier Castro, et Antonello Provenzale. 2013. « Brief communication Decreasing fires in a Mediterranean region (1970—2010, NE Spain) ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-13-649-2013.

Turco, Marco, Jost Von Hardenberg, Amir AghaKouchak, Maria Carmen Llasat, Antonello Provenzale, et Ricardo M. Trigo. 2017. « On the Key Role of Droughts in the Dynamics of Summer Fires in Mediterranean Europe ». *Scientific Reports* 7(1) : 81. doi : 10.1038/s41598-017-00116-9.

Urbieta, Itzíar Rodríguez, Magí Franquesa, Olga Viedma, et José Manuel Moreno. 2019. « Fire activity and burned forest lands decreased during the last three decades in Spain ». *Annals of Forest Science*. doi : 10.1007/s13595-019-0874-3.

Urbieta, Itzíar Rodríguez, Gonzalo Zavala, Joaquín Bedia, José Manuel Gutiérrez, José María Gutiérrez, Jesús San Miguel-Ayanz, Andrea Camia, Jon E. Keeley, et José M. Moreno. 2015. « Fire activity as a function of fire-weather seasonal severity and antecedent climate across spatial scales in southern Europe and Pacific western USA ». *Environmental Research Letters*. doi : 10.1088/1748-9326/10/11/114013.

Vasilakos, Christos, Kostas Kalabokidis, John N. Hatzopoulos, George Kallos, et Yiannis G. Matsinos. 2007. « Integrating new methods and tools in fire danger rating ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf05091.

Vázquez, Antonio, J. S. Ossa Moreno, et José M. Moreno. 1998. « Patterns of Lightning-, and People-Caused Fires in Peninsular Spain ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf9980103.

Vega-García, Cristina, et Emilio Chuvieco. 2006. « Applying local measures of spatial heterogeneity to Landsat-TM images for predicting wildfire occurrence in Mediterranean landscapes ». *Landscape Ecology*. doi : 10.1007/s10980-005-4119-5.

Viedma, Olga, David G. Angeler, et José M. Moreno. 2009. « Landscape structural features control fire size in a Mediterranean forested area of central Spain. » *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf08030.

Viedma, Olga, José M. Moreno, et Ignacio Rieiro. 2006. « Interactions between land use/land cover change, forest fires and landscape structure in Sierra de Gredos (Central Spain) ». *Environmental Conservation*. doi : 10.1017/s0376892906003122.

Vilar, Lara, Andrea Camia, Jesús San-Miguel-Ayanz, et M. Pilar Martín. 2016. « Modeling temporal changes in human-caused wildfires in Mediterranean Europe based on Land Use-Land Cover interfaces ». *Forest Ecology and Management*. doi : 10.1016/j.foreco.2016.07.020.

Virgilio, Giovanni Di, Jason P. Evans, Stephanie A. P. Blake, Matthew J. Armstrong, Andrew J. Dowdy, Jason J. Sharples, et Rick McRae. 2019. « Climate Change Increases the Potential for Extreme Wildfires ». *Geophysical Research Letters*. doi : 10.1029/2019gl083699.

Vitolo, Claudia, Francesca Di Giuseppe, Christopher Barnard, Ruth Coughlan, Jesús San-Miguel-Ayanz, Giorgio Libertà, et Blazej Krzeminski. 2020. « ERA5-based global meteorological wildfire danger maps. » *Scientific Data*. doi : 10,103 8/s 41597-020-0554— z.

Wadhwani, Rahul, Catherine Sullivan, Amila Wickramasinghe, Matthew Kyng, Nazmul Khan, et Khalid Moinuddin. 2022. « A Review of Firebrand Studies on Generation and Transport ». *Fire Safety Journal* 134:103674. doi : 10.1016/j.firesaf.2022.103674.

Wagner, C. E. Van. 1987. *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Forestry Technical Report. Ottawa : Minister of Supply and Services Canada.

Wang, Hai-Hui. 2011. « Analysis on Downwind Distribution of Firebrands Sourced from a Wildland Fire ». *Fire Technology*. doi : 10.1007/s10694-009-0134-4.

Weise, David R., et B. Mike Wotton. 2010. « Wildland—urban interface fire behaviour and fire modelling in live fuels ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf09107.

Werth, Paul, Brian E. Potter, Martin E. Alexander, Craig B. Clements, Miguel G. Cruz, Mark A. Finney, Jason Forthofer, Scott L. Goodrick, Chad M. Hoffman, W. Matt Jolly, Sara McAllister, Roger D. Ottmar, et Russell A. Parsons. 2016. « Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: volume 2 for fire behavior specialists, researchers, and meteorologists ». doi : 10.2737/pnw-gtr-891.

Xystrakis, Fotios, Athanasios S. Kallimanis, Panayotis Dimopoulos, John M. Halley, et Nikos Koutsias. 2013. « Precipitation dominates fire occurrence in Greece (1900—2010): its dual role in fuel build-up and dryness ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-14-21-2014.

Zhuang, Yizhou, Rong Fu, Benjamin D. Santer, Robert E. Dickinson, et Alex Hall. 2021. « Quantifying contributions of natural variability and anthropogenic forcings on increased fire weather risk over the western United States. » *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. doi : 10.1073/pnas.2111875118.

Zscheischler, Jakob, Seth Westra, B. J. J. M. van den Hurk, Sonia I. Seneviratne, Philip J. Ward, Andrew J. Pitman, Amir AghaKouchak, David N. Bresch, Michael Leonard, Thomas Wahl, et Xuebin Zhang. 2018. « Future climate risk from compound events ». *Nature Climate Change*. doi : 10.1038/s41558-018-0156-3.