Chapitre 5 : Changements globaux

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

Rapport de l'expertise scientifique collective

V. Changements globaux

Table des matières du chapitre V

V. Changements globaux 199
1. Introduction 200
2. Présentation du corpus 201
3. Analyse 201
3.1. Le feu, les facteurs déterminants, et la relation avec le climat 201
3.2. Évolution des incendies du passé au présent, effets directs et indirects de l'humanité 207
3.2.1. Au niveau mondial 208
3.2.2. Californie et Amérique du Nord 211
3.2.3. Sud-est de l'Australie 216
3.2.4. Europe et Méditerranée 217
3.3. Attribution des événements incendiaires extrêmes 224
3.3.1. Attribution avec un cadre statistique formel 224
3.3.2. Analyse et compréhension des processus 227
3.3.3. Complexité dans l'attribution de causes 228
3.4. Modélisation des feux, approche dynamique versus statistique 228
3.4.1. Modéliser le feu, ses comportements et ses liens avec le climat 229
3.4.2. Progrès de la modélisation dynamique 231
3.4.3. Modélisation statistique, efficace mais utilité limitée pour prévoir le futur 232
3.4.4. Rôle rétroactif de la végétation pour les incendies 235
3.4.5. Les incendies entrent dans l'opérationnel 236
3.5. Projections futures du danger et de l'activité incendiaire à partir des modèles climatiques 237
3.5.1. Les premières études 238
3.5.2. Régionaliser les scénarios de dernière génération 239
3.5.3. En relation avec le service climatique de Copernicus 241
3.5.4. Une projection du risque d'incendies pour la France 244
3.5.5. Correction multivariée de biais pour un indicateur composé 246
3.6. La transformation des territoires : l'autre facteur d'évolution du risque d'incendie 247
4. Conclusions et perspectives 249
5. À retenir 250
6. Liste des références du chapitre V 251

Essentiels

Le risque incendie évolue sous l'effet combiné du changement climatique, des dynamiques de végétation et des transformations des usages et de l'occupation des sols. Le changement climatique n'engendre pas à lui seul le risque, mais il accroît nettement le danger, allonge les saisons de feu et augmente la probabilité d'épisodes extrêmes :

En Europe, plus de 50 % du territoire pourraient connaître d'ici la fin du siècle un allongement d'au moins 5 jours de la saison des incendies, et la France de 5 à 22 jours selon les régions. Dans le bassin méditerranéen européen, 36 % des surfaces pourraient voir la probabilité d'incendies extrêmes multipliée par 4 à 10 à la fin du siècle (El Garroussi et al. 2024).

Parallèlement, la déprise agricole, la fermeture des milieux (densification de la végétation sauvage jusqu'à une couverture continue) et l'urbanisation accroissent les interfaces ville — espace naturel, donc à la fois l'exposition des enjeux et les opportunités d'allumage d'origine humaine. En Europe, près de 97 % des incendies sont directement ou indirectement liés aux activités humaines (Ganteaume et al. 2013). En France métropolitaine, **ces transformations s'inscrivent dans un contexte d'augmentation de la surface boisée, passée de 9,9 millions d'ha en 1908, à 14,1 millions en 1985 et 17,6 millions d'ha en 2024**, ces recompositions paysagères impliquant aussi une accumulation de biomasse combustible.

En conséquence, **davantage de territoires sont concernés, avec une extension vers des régions historiquement moins exposées. Il y a également des feux potentiellement plus difficiles à contrôler et une pression croissante sur les zones habitées, en particulier aux interfaces.**

1. Introduction

Le feu est un élément naturel du système terrestre depuis l'apparition des plantes vasculaires (plantes à tige, feuilles et racines), il y a environ 420 millions d'années (Silurien supérieur) (Bowman et al. 2020). Le feu joue un rôle important dans l'évolution de l'environnement de la planète, et il montre une diversité remarquable à travers le globe. Les données recueillies entre 2000 et 2021 montrent qu'en moyenne, 3,98 millions de km² de surface terrestre sont brûlés chaque année.

Le feu de végétation est un processus naturel. Les interactions entre le climat, la végétation et le feu ont donné naissance à des régimes d'incendies distincts, définis par leurs fréquences temporelles, leurs étendues et leurs répartitions spatiales, leurs comportements caractéristiques et leurs effets environnementaux. Le régime des incendies est un concept important qui permet de décrire le temps, le lieu et le type des incendies. L'idée principale est que les incendies de végétation ont des propriétés multidimensionnelles et répétitives, de sorte que les structures d'incendies récurrentes peuvent être identifiées et décrites par la fréquence, l'intensité, la répartition, la saisonnalité, la taille et le type d'incendie à des échelles spatiales et temporelles définies.

De nombreuses espèces végétales et animales sont adaptées à un régime d'incendie particulier, et des changements importants dans les caractéristiques de ces incendies peuvent modifier les populations et transformer les écosystèmes. À son tour, la modification du biote influence les incendies ultérieurs, mettant en évidence les effets de rétroaction entre les plantes, les animaux et le feu. Les régimes de feu ont changé à l'échelle géologique au fur et à mesure que le climat, les concentrations d'oxygène atmosphérique et la végétation fluctuaient.

Si le feu en tant que processus n'est pas nouveau, les régimes d'incendies peuvent changer rapidement sous l'effet conjoint du changement climatique, des transformations de la végétation, des activités humaines et des pratiques culturelles (Haas et al. 2024 ; Harrison et al. 2025). Les changements globaux, et en particulier le changement climatique en cours, modifient profondément les conditions de déclenchement, de propagation et

de sévérité des incendies. Ils contribuent à une reconfiguration spatiale du risque, avec l'apparition de feux importants, dans des régions historiquement peu concernées. Ce chapitre analyse ainsi les connaissances scientifiques relatives à ces évolutions, en mettant en évidence les mécanismes climatiques, écologiques et anthropiques à l'œuvre, ainsi que les incertitudes associées.

2. Présentation du corpus

Les références bibliographiques utilisées dans ce chapitre se regroupent en 4 catégories thématiques, suivant la structure de rédaction du chapitre.

La première catégorie comprend les articles qui traitent la relation climat-incendie aux différentes échelles spatio-temporelles. Les différents mécanismes sont présentés.

La deuxième catégorie présente l'évolution historique des incendies, soit à l'échelle globale, soit aux différentes régions géographiques avec risque d'incendie élevé : Amérique du Nord, Australie, et Europe-Méditerranée. Le rôle de l'homme (effets anthropiques directs et indirects) est souvent mis en évidence dans ces études. La méthodologie consiste souvent à faire des analyses statistiques à la recherche des relations climat-homme-feu, avec méthodes plus ou moins avancées (régression linéaire, apprentissage automatique, indicateurs climat composés).

La troisième catégorie considère les incendies majeurs observés dans l'histoire comme des événements extrêmes, il est donc pertinent d'effectuer des analyses d'attribution de causes ou d'évaluation des facteurs d'influence.

Les études de la quatrième catégorie font appel à la modélisation, et l'utilisent pour faire la projection du risque d'incendies dans le futur et en réponse au réchauffement global du climat. La modélisation peut être basée sur les processus et mécanismes (biophysique, comportements sociétaux), ou bien statistique déduite des données existantes. Outre l'échelle globale, les régions de nos principaux intérêts restent toujours l'Amérique du Nord et l'Europe-Méditerranée (régions avec l'abondance de publications).

3. Analyse

3.1. Le feu, les facteurs déterminants, et la relation avec le climat

L'apparition d'incendies nécessite la confluence d'au moins quatre facteurs : allumages, combustibles continus, sécheresses et conditions météorologiques appropriées (vent, températures élevées et faible humidité) (Pausas et Keeley 2021). Le feu étant un processus spatial basé sur la connectivité, il est peu probable que la relation entre les facteurs d'incendie et l'activité effective du feu soit linéaire. C'est pourquoi des changements brusques dans les régimes d'incendie sont possibles, même avec de faibles changements dans les facteurs, ce qui rend la prédiction des incendies difficile. Les facteurs d'incendie peuvent schématiquement être considérés comme des interrupteurs, c'est-à-dire que les incendies se produisent lorsque les quatre facteurs principaux (allumage, combustible, sécheresse et conditions météorologiques favorables aux incendies) sont « activés ». Toutefois, le niveau auquel un facteur s'active (ou se désactive) peut ne pas être fixe ; en outre, les conditions météorologiques liées aux incendies agissent à une échelle spatio-temporelle différente de celle des trois autres facteurs. Il est utile de considérer les incendies de végétation selon une approche fondée sur les seuils (voir figure 1) : les incendies se produisent lorsque trois seuils sont franchis (inflammation, combustible continu et sécheresse), et les conditions climatiques propices aux feux font passer ces seuils à des valeurs inférieures, déclenchant l'apparition et la propagation des incendies.

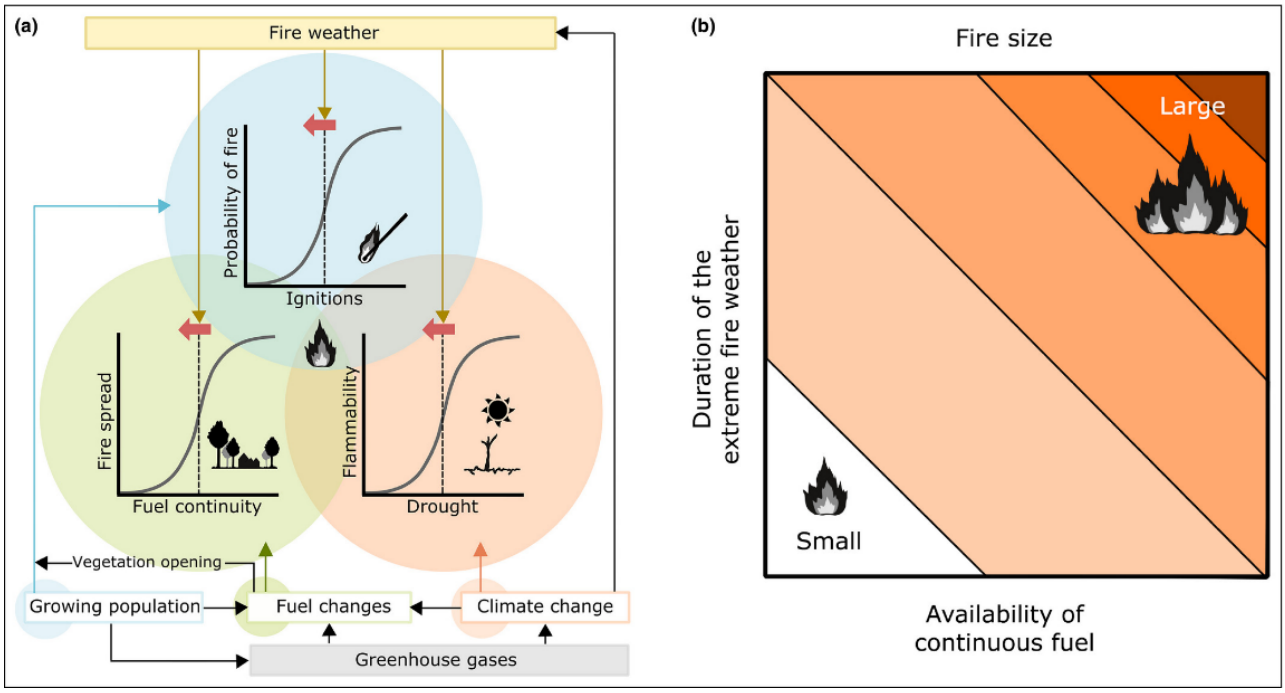


Figure 1 : Modèle conceptuel des relations entre les paramètres des incendies et leurs facteurs d'influence. (a) Probabilité d'incendie (axe des ordonnées) en fonction des quatre principaux facteurs d'influence (axe des abscisses) : la productivité de la biomasse (combustible), la disponibilité du combustible (sécheresse), l'inflammabilité et les sources d'inflammation. (b) Exemple de relation de cause à effet : l'augmentation des températures entraîne un accroissement de la sécheresse, qui à son tour accroît la probabilité d'incendie jusqu'à ce que le combustible devienne un facteur limitant. D'après Pausas et Keeley (2021).

Le schéma conceptuel de quatre facteurs comme interrupteurs du feu se trouve aussi dans Bradstock (2010) pour modéliser et comprendre les régimes d'incendies en Australie (voir Figure 2). La production de biomasse (B), sa disponibilité pour la combustion (A), les conditions météorologiques du feu (S) et l'allumage (I) représentent une hiérarchie de processus conditionnels régissant le feu. Ces quatre facteurs biophysiques doivent être activés simultanément pour qu'un incendie se produise. Si l'un des interrupteurs est désactivé, il n'y aura pas d'incendie. Le feu peut donc être limité de différentes manières, par l'effet de la désactivation de différents interrupteurs. Certains interrupteurs sont plus souvent « éteints » que d'autres dans différents écosystèmes, ce qui se traduit par des régimes d'incendie fondamentalement différents. L'identification de l'interrupteur « limitant » (c'est-à-dire l'interrupteur activé le moins souvent) et sa relation avec les différentes caractéristiques de l'écosystème sont la clé pour comprendre ces variations. Le taux de commutation dans chaque cas est fonction des interactions entre le climat (moyenne et variabilité) et les sols (fertilité, texture, profondeur). Cela façonne les habitats et la sélection des types fonctionnels de plantes disponibles. Par conséquent, l'interrupteur limitant et son taux de commutation inhérent varient parmi les écosystèmes en raison des structures biogéographiques de ces facteurs.

Les influences du changement global sur les régimes d'incendie sont potentiellement variées, en raison de la complexité des processus sous-jacents. Le changement climatique peut potentiellement affecter B, A, S et I, les changements dans l'humidité disponible (via les précipitations, la température, l'évaporation) affectant directement B et A, tandis que les changements de température et de vent affecteront S. Le CO2 élevé peut principalement affecter B et éventuellement A, par le biais d'une altération de la croissance et de la performance compétitive des types fonctionnels de plantes. L'activité humaine peut affecter B et A par l'introduction de nouveaux types fonctionnels de plantes. Des activités telles que le pâturage et le défrichement peuvent affecter directement B, tandis que l'activité humaine peut toujours affecter l'allumage (I). On peut donc s'attendre à ce que les réactions des différents écosystèmes varient en fonction de l'équilibre de ces influences et de la nature de la limitation du régime des incendies dans chaque cas. Les zones boisées devraient être intrinsèquement sensibles aux facteurs qui affectent B, tandis que les forêts devraient être principalement sensibles aux facteurs qui influencent A et S.

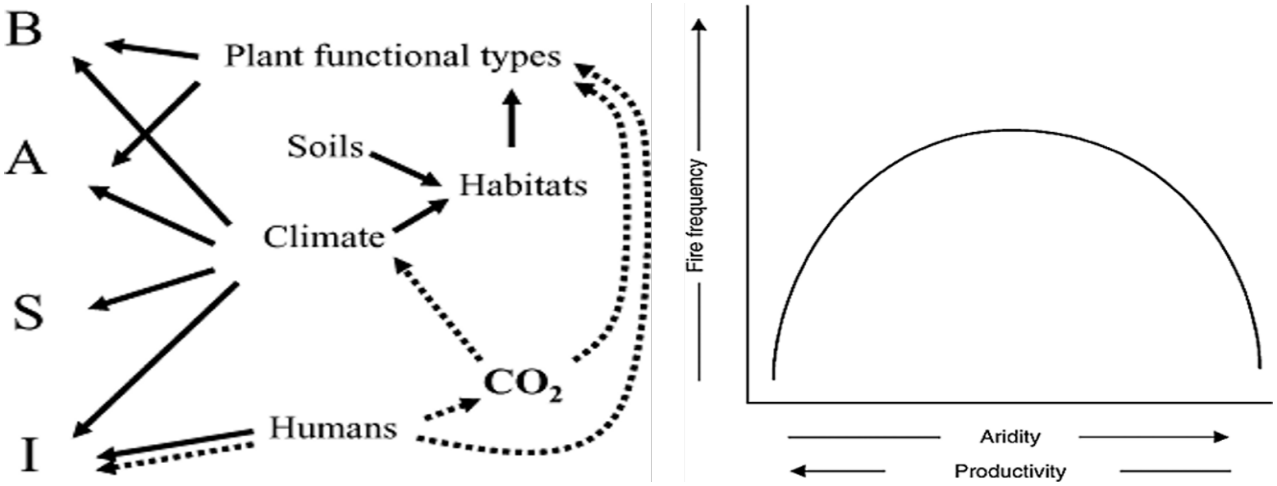


Figure 2 : (à gauche) Influences des facteurs biogéographiques (climat, sols, habitats, types fonctionnels de plantes) sur les régimes de feux via les quatre « interrupteurs » du feu : la biomasse (combustible), la disponibilité de combustible (sécheresse), l'inflammabilité et les allumages. (À droite) Relations potentielles entre l'humidité, la productivité et la fréquence des incendies. Les incendies sont limités par le combustible (biomasse) dans les zones sèches, mais limités par la sécheresse dans les zones humides. D'après Bradstock (2010).

En général, l'activité des incendies présente une relation unimodale (forme cloche, voir figure 2) avec la productivité primaire (Kelly et al. 2023 ; Pausas et Paula 2012). Les régions à productivité intermédiaire, telles que les savanes tropicales le long de l'équateur, connaissent une fréquence élevée d'incendies, due à une production rapide de combustible associée à des saisons sèches prévisibles pendant lesquelles le combustible est disponible pour brûler. En revanche, les régions arides à faible productivité (par exemple, certains déserts d'Afrique, du Moyen-Orient et d'Asie centrale) et les environnements de forêt tropicale humide à forte productivité (par exemple, les zones continues du bassin amazonien) connaissent une fréquence d'incendies relativement faible. Cette considération générale a été très bien illustrée par Guido R. van der Werf et al. (2008), qui ont étudié les relations entre le climat, la production primaire nette et l'activité des incendies dans les régions tropicales et subtropicales. Comme le climat régule la quantité de combustibles secs disponibles pour l'inflammation, il a un impact important sur la variabilité spatiale et interannuelle de l'activité des incendies. Dans les régions arides, l'activité des incendies est limitée par la densité des combustibles disponibles, qui dépend en grande partie de la quantité de précipitations pendant la saison humide précédente. Dans les écosystèmes humides, les incendies se produisent les années où la saison sèche est prolongée, ce qui permet aux combustibles de sécher. La fréquence des incendies est la plus élevée dans les écosystèmes de savane présentant des niveaux de productivité intermédiaires.

Le concept multidimensionnel de régime des incendies offre un moyen très utile d'articuler la manière dont l'activité des incendies évolue à l'échelle globale, de comprendre les causes et les conséquences de l'évolution des structures spatio-temporelles des incendies et d'aider à l'élaboration d'actions et de stratégies pour la gestion des paysages sujets aux incendies. Les deux principales composantes du régime des incendies, l'intensité et la fréquence, doivent être évaluées conjointement. Dans certains cas, une intensité élevée des incendies correspond à une fréquence élevée ; par exemple, la fréquence et l'intensité des incendies sont toutes deux relativement élevées dans l'ouest tempéré de l'Amérique du Nord, le bassin méditerranéen et le sud-est de l'Australie. Dans d'autres cas, les deux variables du régime des incendies diffèrent. Les régions à forte fréquence et intensité modérée des incendies sont typiques de l'Afrique centrale tropicale, de l'Amérique centrale et du nord de l'Australie ; les régions à faible fréquence et forte intensité comprennent les zones arides du centre de l'Australie, l'ouest de l'Amérique du Nord et les régions boréales de haute latitude, telles que l'Alaska, le nord du Canada et l'est de l'Eurasie. La combinaison d'une faible intensité et d'une fréquence élevée des incendies est courante dans les zones à forte densité de population humaine et est révélatrice de l'utilisation des incendies à des fins agricoles, notamment dans le sous-continent indien, l'est des États-Unis, certaines parties de l'Europe, l'est de la Chine et l'Asie du Sud-Est.

Similaire au concept de régime d'incendies, le terme pyrome, comme analogue à biome, est aussi utilisé pour désigner une zone présentant des caractéristiques semblables en matière d'incendies (Archibald et al. 2013). Cinq pyromes distincts sont identifiables et associés à des combinaisons particulières de caractéristiques d'incendie. Deux de ces pyromes ont des superficies brûlées annuelles élevées et des incendies fréquents. Ils diffèrent par la taille et l'intensité des incendies, ainsi que par leur répartition spatiale : l'Australie connaît des incendies plus importants et plus intenses, tandis qu'en Afrique, ce sont des incendies plus petits et moins intenses qui prédominent. Deux autres pyromes ont des incendies peu fréquents et des saisons de feux très courtes. L'un présente des incendies de grande intensité et de grande ampleur, et l'autre des incendies de moindre intensité et de plus petite ampleur. Ces pyromes dominent dans les régions tempérées et boréales, mais sont également présents ailleurs. Un dernier pyrome a des intervalles de retour des incendies intermédiaires, mais des incendies assez petits. Ce pyrome est présent dans le monde entier, en particulier dans les régions de déforestation et d'agriculture.

Il est clair que la compréhension des facteurs qui déterminent les régimes d'incendies est importante pour son application dans des outils de prévision et gestion. Le climat agit à la fois sur l'humidité des combustibles (inflammabilité, aptitude à brûler) et sur leur structure (quantité et connectivité). Dans les régions humides et productives, les combustibles ne constituent pas un facteur limitant et l'activité des incendies est déterminée par la fréquence à laquelle les conditions inflammables sont réunies (régimes des incendies liés à la sécheresse) ; tandis que dans les systèmes arides improductifs, la pénurie de combustibles détermine l'activité des incendies (régimes des incendies liés à la pénurie de combustibles). Pausas et Paula (2012) ont montré que le seuil pour avoir un fort risque d'incendie dépend de l'aridité du climat régional, et qu'il est plus facilement atteignable aux régions sèches qu'aux régions humides. En fait, le changement requis de l'indice d'aridité pendant la saison des incendies pour atteindre des conditions inflammables (c'est-à-dire la différence entre les conditions moyennes pendant la saison des incendies et le seuil d'aridité) est négativement lié à l'indice d'aridité annuel moyen. Autrement dit, les régions productives nécessitent une plus grande réduction de l'humidité pour devenir inflammables. Par exemple, le changement de l'indice d'aridité nécessaire pour atteindre des conditions inflammables dans la région la plus humide est deux fois plus important que celui requis dans la région la plus sèche. La fréquence de dépassement de ce seuil (c'est-à-dire le taux de passage à des conditions inflammables) est également plus élevée dans les environnements secs.

L'activité incendiaire est inextricablement liée au régime d'incendies qui peut être décrit en termes d'intensité, de fréquence, de saisonnalité et de type d'incendie sur un site, mais il englobe également une série de périodes et d'échelles spatio-temporelles. Des tentatives ont été faites pour élaborer une évaluation globale des régimes de feux, mais il existe encore de grandes disparités dans l'état des connaissances sur les facteurs déterminants des régimes de feux dans différentes régions géographiques. Harris et al. (2016) essayent d'identifier les aspects de l'activité des feux qui peuvent être compris et modélisés dans le contexte du changement climatique. De nombreux défis se posent sur l'identification des facteurs biologiques, socio-économiques et physiques, et sur les difficultés à mesurer les interactions et les rétroactions à plusieurs échelles entre ces facteurs. Cette complexité limite notre capacité à intégrer les incendies dans les modèles du système terrestre et à prévoir leur activité future dans le contexte du changement climatique. Les expériences de modélisation dynamique peuvent faciliter des études plus approfondies des rétroactions et des interactions entre les incendies, la végétation et le climat, mais leur succès dépendra du développement de modèles dynamiques de végétation globale (DGVM) qui incluent les facteurs biologiques. Ces modèles dotés de modules incendie sont des outils prometteurs pour développer une analyse cohérente à l'échelle mondiale de l'activité incendiaire (modèle UK MetOffice, [Teixeira et al. 2021) et modèle CLM-CN [Kloster et al. 2011]). Mais la projection de l'activité incendiaire future nécessitera une synthèse transdisciplinaire des facteurs biologiques, atmosphériques et socio-économiques des incendies.

Harrison et al. (2021) ont présenté un cadre centré sur les écosystèmes pour une meilleure compréhension des incendies. Les feux ont une longue histoire géologique et constituent un processus naturel omniprésent dans les communautés végétales contemporaines. Un monde sans incendies aurait une couverture forestière plus importante, en particulier dans les savanes actuelles. De nombreuses espèces disparaîtraient, car les régimes d'incendies ont co-évolué avec les caractéristiques des plantes qui résistent, s'adaptent ou favorisent les feux de végétation. Certaines caractéristiques des plantes sont favorisées par différentes fréquences d'incendies et

peuvent être absentes dans les écosystèmes qui sont normalement exempts d'incendies. Par exemple, la repousse après un incendie est plus fréquente chez les plantes ligneuses dans les régimes de feux à haute fréquence que dans ceux où les feux sont peu fréquents. L'impact de la fragmentation de l'habitat sur les incendies de végétation dépend essentiellement de l'adaptation de l'écosystème au feu. Dans les écosystèmes normalement exempts de feux, la fragmentation facilite le déclenchement des incendies et nuit à la biodiversité. Dans les écosystèmes adaptés au feu, la fragmentation empêche les incendies de se propager et leur extinction est préjudiciable à la biodiversité. Cette interprétation explique les modèles observés, contre-intuitifs, de corrélation spatiale entre les incendies et les sources d'inflammation potentielles. Les modèles d'interactions entre la végétation et le feu doivent s'appuyer sur les connaissances en écologie du feu afin de faire des projections crédibles pour l'avenir dans un climat en mutation.

Rachel A. Loehman et al. (2020) ont utilisé un modèle de processus écosystémiques, FireBGCv2, pour illustrer comment les interactions complexes et rétroactives entre le climat, les perturbations et la végétation peuvent modifier radicalement les configurations spatiales du paysage et influencer la dynamique des écosystèmes. FireBGCv 2 est un modèle de processus écosystémiques liés aux feux à l'échelle du paysage. C'est une plateforme idéale pour éclairer la gestion des terres, car il fournit des informations que ne permettraient pas d'obtenir des modèles plus simples, non spatiaux et empiriques. Il opère à travers des échelles spatiales hiérarchiques allant du paysage, du peuplement, de la parcelle et de l'espèce jusqu'aux arbres individuels, avec des attributs tels que l'espèce, l'âge, la hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine et la surface foliaire. Le climat, les feux et la végétation du paysage modélisés sont liés de manière dynamique et interactive ; les séries chronologiques à long terme des températures quotidiennes, des précipitations et du rayonnement influencent la production de combustible et l'humidité, qui déterminent le potentiel d'inflammation du paysage, la fréquence et l'ampleur des feux, ainsi que leur comportement. Le climat et les conditions météorologiques influencent la productivité et les taux de mortalité des espèces végétales individuelles et, par conséquent, la composition et la structure des peuplements — avec des rétroactions sur le régime des feux via le type, la quantité et la disposition du combustible. Les régimes de feu, à leur tour, affectent la régénération, la composition, les trajectoires de succession et la productivité des espèces végétales, directement par le biais de la mortalité induite par le feu et des schémas de succession, et indirectement par leur influence sur la disponibilité de la lumière, de l'eau et d'autres ressources nécessaires. Les simulations réalisées à l'aide d'un tel outil de modélisation sont extrêmement utiles pour orienter les décisions de gestion et pour proposer des solutions potentielles aux problèmes complexes liés à la gestion des terres. Le modèle est ensuite appliqué aux paysages forestiers de l'ouest des États-Unis. Les résultats du modèle indiquent que les stratégies classiques de gestion des terres ne suffiront probablement pas à contrer les impacts du changement climatique rapide et des régimes de perturbation modifiés qui menacent la stabilité des écosystèmes. Sans la mise en œuvre de nouvelles stratégies de gestion adaptatives, les paysages futurs seront très probablement différents de ceux du passé ou d'aujourd'hui, avec des changements significatifs et parfois persistants déclenchés par les interactions entre le climat et les incendies de végétation.

Le rôle des incendies dans l'écosystème est aussi étudié sur des sites locaux par une modélisation locale. C'est ce que Mouillot et al. (2002) ont fait sur un écosystème local en Corse dont les constituantes (différentes espèces de végétation) peuvent évoluer dynamiquement, les incendies y jouent le rôle d'un perturbateur majeur. Mouillot et al. (2002) rapportent une étude de modélisation sur un écosystème typique méditerranéen en introduisant une paramétrisation des incendies et ses effets sur l'écosystème. Le site d'étude est une zone de maquis arbustif avec une forêt de pins qui couvre les sols acides du centre de la Corse (France, 43,12 N de latitude, 9,12 E de longitude). Un modèle basé sur les processus, SIERRA (un simulateur pour les paysages méditerranéens), est utilisé pour simuler les communautés végétales et les paysages méditerranéens et leur réponse aux incendies. Le modèle permet de prévoir la dynamique des populations en prédisant la dispersion, la germination, la croissance, la survie et la reproduction. Le stress hydrique est utilisé pour formuler le risque d'incendie dans le modèle.

Cela permet de comparer les effets du changement climatique, avec les effets d'incendie inclus sur la dynamique de la végétation et certaines fonctions de l'écosystème d'une forêt de maquis méditerranéen. Trois jeux de simulations ont été effectués et analysés. S0 correspond au climat actuel et deux scénarios du changement climatique futur (issues d'un modèle global du climat) sont notés S1 et S2 : S1 n'impliquant qu'un changement

dans le régime des précipitations (un assèchement général mais avec une augmentation de fortes pluies) et S2 où les changements dans le régime des précipitations sont associés à des changements de température. Étant donné que l'altération du risque d'incendie peut être le principal changement écosystémique en cas de changement global dans le bassin méditerranéen, résultant de modifications du bilan hydrique, le schéma temporel des incendies peut être le principal facteur déterminant la composition de la communauté. Le rôle des incendies successifs dans la détermination de la composition de la communauté végétale reste le même dans les trois scénarios climatiques. C'est donc la fréquence des incendies dans chaque scénario qui détermine le pourcentage de couverture des différentes communautés qui ont survécu aux incendies successifs. Les changements climatiques tendent à réduire l'intervalle de temps entre deux incendies successifs de 20 à 16 ans pour le maquis arbustif et de 72 à 62 ans dans les étages forestiers. Cette augmentation de la fréquence des incendies conduit à des paysages dominés par les arbustes, ce qui accentue la production d'eau par un drainage profond et un ruissellement supplémentaire.

Dans un article de synthèse, Amy E. Hessl (2011) a mis en évidence les mécanismes par lesquels le changement climatique peut modifier les régimes d'incendies. Le climat, les changements de végétation et les activités humaines peuvent influencer les combustibles à différentes échelles spatiales et temporelles, ce qui entraîne plusieurs voies de changement possibles dans les régimes d'incendies. La température, l'humidité relative, les précipitations et la vitesse du vent influencent toutes la façon dont les incendies brûlent à court terme, en agissant à la fois sur l'état des combustibles et sur la quantité de transfert de chaleur nécessaire à la combustion de ces combustibles. À l'échelle de quelques semaines à quelques mois, les variables météorologiques peuvent influencer la durée de la saison des incendies, la fréquence des incendies causés par la foudre et l'abondance des combustibles fins. À l'échelle de quelques années à quelques décennies, le climat peut influencer les régimes d'incendie en modifiant la productivité primaire nette, la décomposition, la structure de la végétation, la composition de la végétation, la densité, la charge en combustibles et la connectivité des combustibles à travers un paysage. Sur la base de ces principes généraux, il est proposé que le changement climatique puisse modifier l'activité des incendies de trois manières : modification de l'état du combustible, changements dans la charge combustible et changements dans les sources d'inflammation. Bien que ces voies ne soient pas totalement indépendantes, elles constituent les trajectoires principales susceptibles de se produire compte tenu du changement climatique.

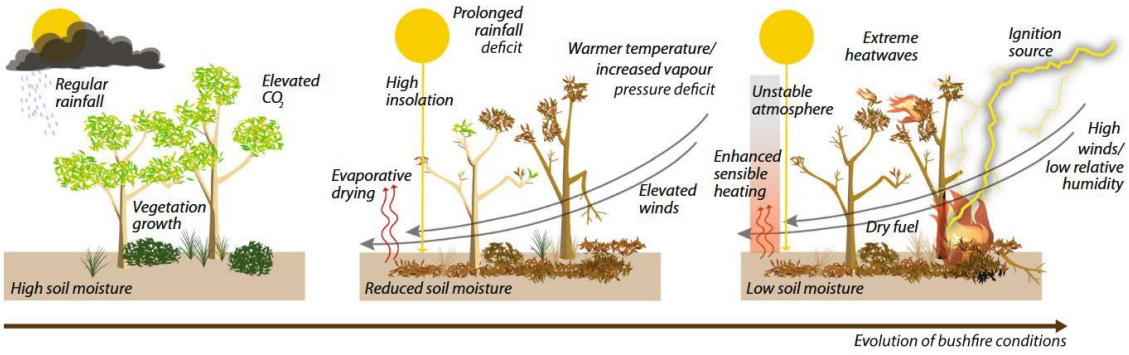


Figure 3 : Processus climatiques associés au risque d'incendie de végétation. Schéma des processus importants pour les incendies de végétation de 2019-2020 en Australie, y compris les processus climatiques à grande échelle et les facteurs météorologiques locaux contribuant au risque d'incendie extrême. Les rétroactions entre le feu et la météo peuvent aussi augmenter le risque d'incendie. Est également montrée l'évolution des conditions paysagères propices aux grands incendies au Sud-est de l'Australie, en Californie, et en régions méditerranéennes. D'après Abram et al. (2021).

Abram et al. (2021) traite aussi la relation entre le climat et les incendies, sur fond de catastrophe des feux de brousse de l'été noir 2019/20 dans le sud-est de l'Australie. L'événement était sans précédent dans les archives historiques, au niveau de l'étendue des forêts brûlées, de la puissance radiative des incendies et du nombre extraordinaire d'incendies qui se sont transformés en événements pyroconvectifs extrêmes. L'année 2019, la plus chaude et la plus sèche jamais enregistrée en Australie, a été caractérisée par des charges de combustible

exceptionnellement sèches qui ont préparé le paysage à brûler lorsqu'il a été exposé à des conditions météorologiques dangereuses et à l'inflammation. La combinaison de la variabilité climatique et des tendances climatiques à long terme a généré les extrêmes climatiques observés en 2019, et les effets cumulés de deux modes (ENSO et IOD) dans leurs phases de promotion des incendies ont historiquement augmenté les risques d'apparition de grands incendies de forêt dans le sud-est de l'Australie. Les données paléoclimatiques montrent également que les phases de variabilité de l'océan Pacifique tropical et de l'océan Indien qui favorisent les incendies sont aujourd'hui inhabituellement fréquentes par rapport à la variabilité naturelle de l'époque préindustrielle. Les multiples facteurs de changement climatique qui contribuent au risque d'incendie dans le sud-est de l'Australie, ainsi que la progression non linéaire observée de l'étendue et de l'intensité des incendies, augmentent la probabilité que les incendies continuent à s'intensifier rapidement à l'avenir (voir figure 3 pour un schéma conceptuel des processus).

La relation entre la météo et le feu est complexe. On utilise généralement les conditions météo en relation avec la haute température, la sécheresse, le fort vent et le manque de pluie pour étudier les incendies. Su et al. (2025) démontrent deux conditions supplémentaires qui complètent les variables précédemment citées. Il s'agit du potentiel de convection présent dans l'atmosphère (susceptible de générer des orages) et l'abondance des combustibles sur le sol.

L'étude de Westerling et al. (2003) a démontré une relation intéressante entre les incendies et les conditions climatiques de sécheresse. Il a été montré que les conditions de sécheresse précédentes exercent une influence sur les incendies. Ce concept de relation décalée a été ensuite aussi exploité par d'autres chercheurs. Ce résultat reflète un compromis entre l'accumulation de combustible et l'inflammabilité, les conditions humides (sèches) de l'année précédente contribuant à (inhiber) l'accumulation de combustible et les conditions humides (sèches) de l'année en cours supprimant (favorisant) l'activité du feu en humidifiant (asséchant) les combustibles.

Les activités du feu varient à différentes échelles temporelles et en fonction des grands modes oscillatoires du système climatique tels que El Niño-Oscillation australe (ENSO), Oscillation décennale du Pacifique (PDO) et Oscillation multi-décennale de l'Atlantique (AMO). En effet, ces modes climatiques peuvent entraîner les structures de sécheresse et d'incendie à l'échelle continentale. Kitzberger et al. (2007) ont utilisé des cicatrices de feu sur les cernes des arbres dans l'ouest de l'Amérique du Nord pour reconstituer des chronologies locales des incendies qui remontent dans le temps jusqu'à 1550. Depuis 1550, la sécheresse et les incendies ont coïncidé dans l'ouest des États-Unis, mais d'une manière qui dépendait des modes oscillatoires du climat. Au cours de certaines phases de l'ENSO et de la PDO, les incendies étaient synchrones dans de vastes sous-régions et parfois asynchrones entre ces régions. En revanche, les incendies étaient le plus souvent synchrones dans l'Ouest pendant les phases chaudes de l'AMO. L'ENSO et la PDO ont été les principaux facteurs de variation à haute fréquence des incendies (interannuelle à décennale), tandis que l'AMO a modifié de manière conditionnelle la force et l'influence spatiale de l'ENSO et de la PDO sur la survenue d'incendies à l'échelle pluri-décennale. De même, Marcos Rodrígues et al. (2021) ont aussi montré que la NAO (North Atlantic Oscillation), un important mode de variabilité du climat, impacte fortement les activités incendiaires en Europe.

3.2. Évolution des incendies du passé au présent, effets directs et indirects de l'humanité

La maîtrise du feu par des hominidés, il y a environ un million d'années, a introduit une grande complexité dans la temporalité, la localisation, l'étendue et le comportement des incendies Kelly et al. (2023). Les ancêtres de l'homme ont évolué dans des paysages sujets aux incendies. Des traces archéologiques de feu indiquent une utilisation délibérée du feu par l'homme pour cuisiner, se réchauffer et s'éclairer dès le Pléistocène moyen (il y a environ 400 000 ans) en Afrique et en Eurasie occidentale. Par exemple, les chasseurs-cueilleurs géraient les ressources naturelles à l'aide du feu, attirant les herbivores vers les zones fraîchement brûlées. À partir de l'Holocène, il y a environ 12 000 ans, les reconstitutions paléo-incendiaires et les données archéologiques indiquent une utilisation généralisée du feu pour la chasse, la cueillette, le pastoralisme et l'agriculture — des utilisations

habiles du feu qui constituent encore aujourd'hui un continuum de pratiques dans le monde entier. Les agriculteurs préindustriels utilisaient également le feu pour défricher les terres et brûler les résidus de culture.

À l'ère moderne, dite anthropocène, il existe de plus en plus de preuves que l'homme altère la portée historique et la variation des caractéristiques du feu et génère des changements écologiques de grande ampleur. De plus, les humains contemporains façonnent les régimes de feux en supprimant les incendies naturels et en modifiant les paysages et les charges combustibles par le biais de brûlages contrôlés (feux dirigés), du défrichage, de l'urbanisation, de la culture de plantes non indigènes et de l'élevage. Les humains provoquent également, accidentellement ou intentionnellement, des incendies qui deviennent incontrôlables et qui sont parfois destructeurs sur le plan économique et mortels (catastrophes incendiaires). À l'échelle mondiale, très peu d'environnements végétalisés ne sont pas affectés par l'utilisation du feu par les humains.

Un certain nombre de stratégies ont été employées pour tenter de déterminer le rôle des humains dans la survenue des incendies. Il existe des ensembles de données qui fournissent des observations directes sur l'heure de départ, la source d'allumage et la zone brûlée finale des incendies individuels, et ces observations sont attribuées à la foudre, aux humains ou à des causes inconnues. Toutefois, ces observations directes ne sont disponibles que pour des zones limitées et ne couvrent qu'une période relativement courte. Les observations par satellite fournissent des informations sur les propriétés des incendies à l'échelle mondiale, mais l'enregistrement est plus faible aux latitudes élevées. Ces observations ne permettent pas de distinguer les incendies d'origine humaine des incendies d'origine naturelle, bien que l'importance relative de chacun d'entre eux puisse être déduite des corrélations avec les données relatives à la population humaine ou les indices de fragmentation du paysage. Toutefois, les données satellitaires ne couvrent que les dernières décennies. Chuvieco et al. (2018) présentent un jeu de données de la surface brûlée (BA), déduites de l'instrument MODIS à bord des satellites de la NASA Aqua et Terra qui nous fournissent une capacité de surveillance globale des incendies.

Yannick Le Page et al. (2010) ont publié une étude sur la saisonnalité des feux à l'échelle globale. La saisonnalité des feux est liée à des variables climatiques, anthropiques, ainsi qu'à celles relatives à la couverture et à l'occupation du sol. Elle peut être calculée à partir des conditions climatiques pour obtenir une saisonnalité « naturelle ou potentielle ». La déviation de cette saisonnalité potentielle avec celle obtenue des observations satellitaires met en évidence l'effet de l'intervention humaine. Les activités anthropiques exercent une forte influence sur la saisonnalité des feux. La spécificité des principales pratiques en matière d'incendies peut être ainsi identifiée par l'écart entre la saisonnalité observée et la saisonnalité potentielle.

Les charbons de bois sédimentaires et les enregistrements chimiques, tels que le carbone noir et l'ammonium des carottes glaciaires, fournissent des informations sur les changements dans la combustion de la biomasse sur plusieurs millénaires. Bien que ces données ne fournissent aucune preuve directe de la cause des incendies, elles peuvent être utilisées pour déduire l'importance relative du climat et des activités humaines en les comparant à des données indépendantes sur le climat et l'évolution de la population humaine. Les archives sédimentaires de charbon de bois indiquent un déclin global des incendies au cours du XXe siècle, qui a été attribué aux changements dans l'utilisation des terres et à l'expansion des terres cultivées, comme c'est le cas pour le déclin au cours des décennies les plus récentes. Ainsi, tant les archives paléographiques que les preuves plus récentes suggèrent que l'impact le plus important de l'humanité a été de réduire les incendies à l'échelle régionale et mondiale. La modélisation permet également d'évaluer les hypothèses concernant le rôle du climat et des activités humaines sur les incendies à différentes échelles de temps.

3.2.1. Au niveau mondial

La plupart des incendies sur Terre sont de faible ampleur et ne causent pas de dommages notables. En effet, l'incendie joue un rôle crucial dans la santé de la plupart des écosystèmes adaptés au feu. Il a été largement rapporté que la superficie brûlée à l'échelle mondiale a diminué au cours de ce siècle, mais cette tendance est principalement due à la diminution des incendies de faible intensité dans les prairies et les savanes africaines. À l'échelle mondiale, l'intensité moyenne des incendies a également diminué au cours de ce siècle (avec quelques augmentations régionales), mais la sévérité des brûlures, une mesure écologique des effets immédiats d'un incendie (par exemple, la perte de biomasse et la mortalité), augmente dans plus de régions qu'elle ne diminue. Contrairement à la majorité des incendies, les feux de forêt extrêmement énergiques sont associés à des

conséquences écologiques, sociales et économiques extrêmes, notamment l'émission de grandes quantités de fumée et de gaz à effet de serre qui menacent d'accélérer encore le réchauffement climatique.

Cunningham et al. (2024) ont utilisé 21 années (2003-2023) d'observations satellitaires de la puissance radiative des feux (FRP, mégawatts) provenant du MODIS pour évaluer si les incendies à très grande énergie augmentent en fréquence et/ou en ampleur. Ils ont calculé la puissance radiative quotidienne cumulée (ΣFRP) des foyers d'incendie actifs dans un maillage de 0,2° à aire égale à travers la Terre afin de créer un indicateur des incendies extrêmement puissants, définis comme ceux dépassant le 99,99e percentile de la ΣFRP quotidienne. Nous avons téléchargé les données points chauds d'incendie MODIS pour une période étendue aux années récentes 2024 et 2025. Nous avons ensuite suivi la méthodologie de Cunningham et al. (2024). Les résultats (montrés à figure 4) confirment leurs conclusions. La fréquence des incendies extrêmes a été multipliée par 2,2 sur la période d'étude, et cette augmentation semble s'accélérer. Des événements extrêmes se sont produits sur tous les continents, à l'exception de l'Antarctique. Outre la fréquence croissante des incendies extrêmes, leur ampleur a également augmenté de manière significative. Pour les 20 événements les plus extrêmes de chaque année, la ΣFRP moyenne a également été multipliée par 2,3.

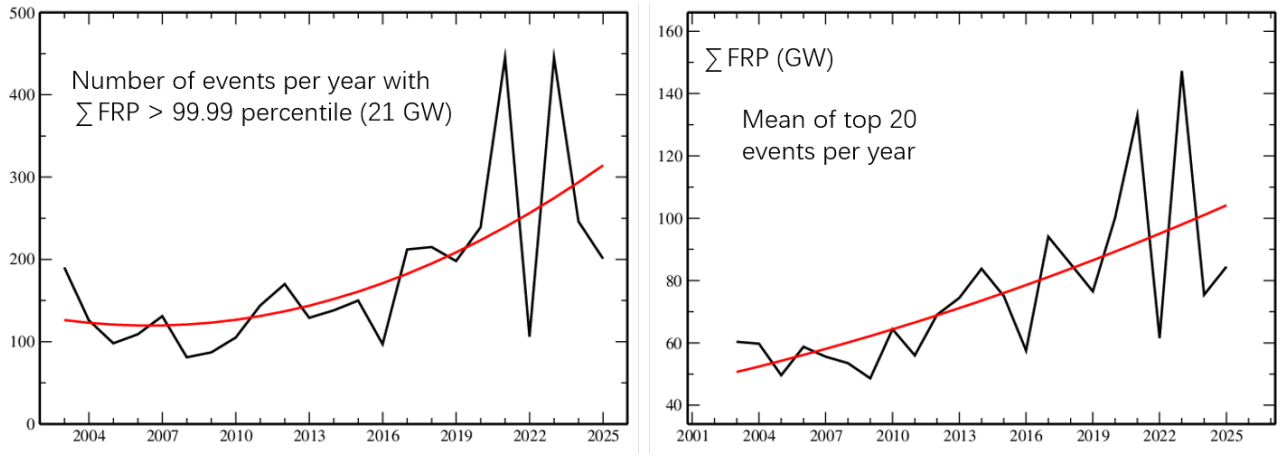


Figure 4 : Tendances des incendies de végétation les plus extrêmes sur Terre, résultats élaborés à partir des données FRP (Fire Radiative Power : puissance radiative du feu) de l'instrument MODIS à bord des satellites Aqua et Terra opérés par la NASA. La procédure du traitement est celle utilisée par Cunningham et al. (2024). Notamment, la somme FRP (ΣFRP) a été calculée en additionnant les FRP des points chauds MODIS sur une grille de 0,2° à aire égale pour chaque jour de 2003 à 2025. Les données MODIS ont été obtenues du serveur FTP de University of Maryland (sftp://fuoco.geog.umd.edu). (À gauche) Le nombre annuel (indiquant la fréquence) des incendies extrêmes dont la puissance ΣFRP dépasse le seuil du 99,99e percentile (environ 21 GigaWatts). Il a plus que doublé au cours de la période de 2003 à 2025. (À droite) Les 20 événements les plus extrêmes de chaque année montrent une augmentation soutenue de l'intensité moyenne (GW) des incendies extrêmes. Les courbes rouges représentent une régression quadratique.

Jolly et al. (2015) ont présenté une analyse des tendances quotidiennes en matière de conditions météorologiques propices aux incendies entre 1979 et 2013, basée sur trois jeux de données météorologiques globales de réanalyse (NCEP, NCEP-DOE et ERA-Interim) avec une résolution de maille comprise entre environ 0,75° et 2,0°. Ces données ont été utilisées pour calculer les différents indices forêt météo. Les indices quotidiens de danger d'incendie (normalisés à une échelle commune et rééchantillonnés à une résolution commune) ont été utilisés pour calculer la durée de la saison des incendies, définie comme le nombre de jours par an où le danger d'incendie est supérieur à la moitié de sa plage de valeurs, pour chaque année au cours des 35 dernières années dans chaque cellule de la grille. À l'échelle mondiale (voir figure 5), la durée de la saison des incendies a augmenté de 18,7 % entre 1979 et 2013, avec des augmentations statistiquement significatives observées sur 25,3 % (29,6 millions de km²) de la superficie végétalisée mondiale et des diminutions sur seulement 10,7 % (12,5 millions de km²). La superficie touchée par de longues saisons propices aux incendies, définie comme la superficie mondiale totale observant des saisons propices aux incendies > 1 écart-type par rapport à la moyenne, a

augmenté de 3,1 % par an entre 1979 et 2013, ce qui a entraîné une augmentation de 108,1 % de la superficie mondiale touchée par de longues saisons propices aux incendies. La fréquence des longues saisons de temps propice aux incendies a augmenté sur 53,4 % de la superficie végétalisée mondiale (62,4 millions de km²) entre 1996 et 2013, par rapport à 1979-1996, avec une diminution de la fréquence observée seulement sur 34,6 % (40,4 millions de km²). Les deux indicateurs relatifs à la saison des incendies étaient fortement corrélés au nombre annuel moyen mondial de jours sans précipitations (> 0,1 mm), le nombre moyen mondial de jours sans pluie représentant 49,7 % de la variation de la durée mondiale de la saison des incendies et 33,8 % de la variation de la superficie mondiale touchée par une longue saison des incendies.

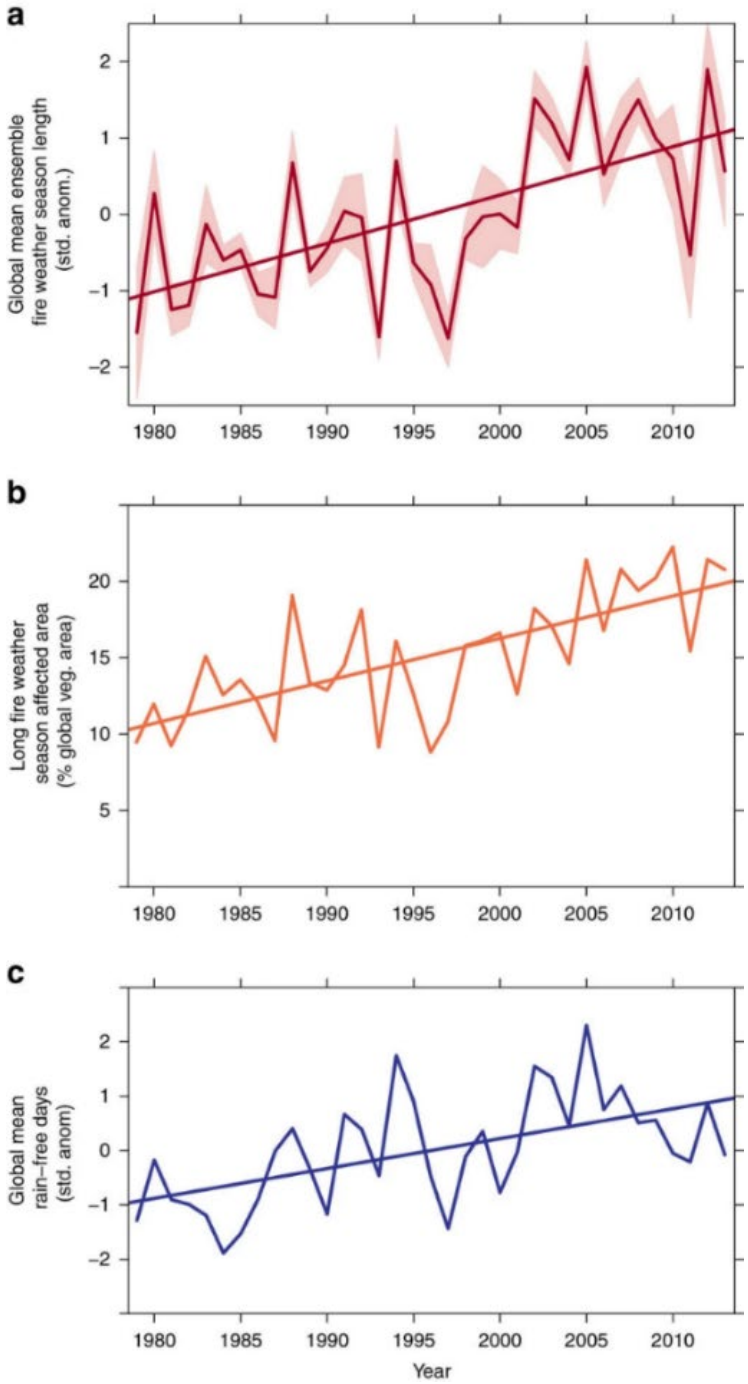


Figure 5 : Tendances relatives à la durée moyenne mondiale de la saison des incendies et au nombre de jours sans pluie. (a) Évolution de la durée moyenne mondiale de la saison des incendies entre 1979 et 2013, exprimée en anomalie et en écart-type interannuel, avec des limites de confiance à 95 % entre les membres de l'ensemble (zone ombrée). (b) Superficie totale annuelle mondiale touchée par de longues saisons des incendies (> 1σ de la moyenne historique), exprimée en pourcentage de la surface végétalisée globale. (c) Variations des jours sans pluie en moyenne globale, exprimées en écart-type interannuel. D'après Jolly et al. (2015).

La variabilité interannuelle et décennale des incendies est également fortement modulée par les téléconnexions, c'est-à-dire les grands modes oscillatoires du système climatique tels que l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO), l'Oscillation décennale du Pacifique (PDO) ou encore El Niño-Oscillation australe (ENSO). En pilotant les structures de précipitations et de températures à l'échelle continentale (Kitzberger et al. 2007), le basculement cyclique de ces modes océaniques et atmosphériques génère une forte volatilité hydroclimatique. La volatilité hydroclimatique désigne de soudaines et importantes transitions (comme un coup de fouet, *whiplash* en anglais) entre des conditions très sèches et très humides. Les transitions de l'humidité à la sécheresse peuvent amplifier le risque d'incendies en permettant une accélération de la croissance des plantes (herbacées en particuliers) et de l'accumulation de biomasse dans les écosystèmes, immédiatement suivie d'un assèchement rapide de la végétation inflammable, ce qui augmente l'intensité potentielle des incendies ultérieurs en raison d'une charge de combustible accrue, en particulier dans les paysages non boisés (Swain et al. 2025).

3.2.2. Californie et Amérique du Nord

L'ouest des États-Unis a connu une augmentation des incendies. De nombreuses études cherchent à expliquer cette augmentation, en se concentrant soit sur l'histoire de l'utilisation des terres, soit sur le climat comme causes principales (Westerling et al. 2006). Si l'augmentation des risques d'incendies est principalement due à l'histoire de l'utilisation des terres, alors la restauration écologique et la gestion des combustibles sont des solutions potentielles. Cependant, si l'augmentation des risques est largement due aux changements climatiques de ces dernières décennies, alors la restauration et les traitements des combustibles pourraient s'avérer relativement inefficaces pour inverser la tendance.

Syphard et al. (2017) proposent une étude intéressante. Elle ne met pas en cause la relation feux et climat, mais elle insiste sur la variation géographique de ces relations. Elle conclut finalement que le contexte géographique et l'influence humaine doivent être pris en compte pour la gestion et la prise de décisions.

Afin de quantifier l'importance relative et géographiquement variable des différentes variables climatiques dans l'explication de l'activité des incendies, Syphard et al. (2017) ont utilisé un algorithme de partitionnement hiérarchique qui emploie une hiérarchie de modèles de régression avec toutes les combinaisons de variables explicatives pour calculer le pourcentage d'influence indépendante de chaque variable (biophysique et humaine), avec ou sans son influence conjointe via d'autres variables. Un tel algorithme évite les problèmes de multicolinéarité et fournit une quantification discrète de l'importance relative des variables. L'étude a été appliquée à 37 régions différentes à travers les États-Unis continentaux. Les variations climatiques ont joué un rôle important dans l'explication de l'activité incendiaire annuelle dans certaines régions, mais l'importance relative du climat variait considérablement en fonction du contexte géographique. La présence humaine était la principale raison pour laquelle le climat expliquait moins l'activité des incendies dans certaines régions que dans d'autres. En d'autres termes, là où la présence humaine était plus importante, le climat était moins important. Cela signifie que les humains peuvent non seulement influencer les régimes d'incendie, mais que leur présence peut en fait l'emporter sur l'effet du climat ou le noyer. Ainsi, le contexte géographique ainsi que l'influence humaine doivent être pris en compte parallèlement au climat dans la politique et la gestion en matière d'incendies de végétation.

Cathy Whitlock et al. (2008) rapportent une étude qui traite la relation entre le climat, la biomasse et le feu sur le plan paléo : de la fin de la dernière glaciation à l'Holocène (derniers 10 000 ans). Elle nous apporte une vision à long terme dans le passé, à contraster avec la période anthropique depuis la révolution industrielle. Les archives polliniques et charbonnières à haute résolution, extraites des sédiments lacustres de 15 sites du nord-ouest des États-Unis et datant de l'Holocène, permettent d'étudier les liens entre les incendies, le climat et les combustibles à différentes échelles temporelles et spatiales. L'étude de Cathy Whitlock et al. (2008) montre que les niveaux généraux de charbon de bois étaient faibles à la fin de la période glaciaire et ont augmenté régulièrement au cours des 11 000 dernières années avec l'augmentation de la biomasse combustible. À l'échelle locale, la fréquence des incendies est régie par l'interaction de facteurs liés au site, notamment la végétation, le climat local, les conditions météorologiques propices aux incendies et la topographie. À l'échelle régionale, les sites situés dans les zones actuellement sèches en été ont connu une période d'activité incendiaire intense et prolongée au début de l'Holocène, attribuée à l'intensification de la sécheresse estivale dans ces régions. Les

sites localisés dans les zones humides en été présentent une tendance inverse, avec une fréquence des incendies plus faible qu'aujourd'hui au début de l'Holocène en raison du renforcement de la circulation de mousson. La fréquence plus élevée des incendies sur de nombreux sites au cours des 2000 dernières années est attribuée à une sécheresse plus importante pendant l'anomalie climatique médiévale et peut-être à des brûlages anthropiques.

L'étude de Philip E. Higuera et al. (2021) est intéressante et elle place les observations récentes (1984/2020) de fortes activités incendiaires dans les forêts subalpines des Rocheuses dans le contexte des deux derniers millénaires (voir figure 6). Elle introduit la notion de FRP (*Fire Rotation Period* : la durée du temps requis pour que la surface brûlée soit égale en taille à la superficie de la zone considérée). FRP peut être équivalente à « Rate of Burning » (pourcentage de surface brûlée pendant une durée de 100 ans). Ces forêts subalpines des Rocheuses sont des sentinelles utiles pour observer les effets du changement climatique, car leur climat généralement frais et humide limite la fréquence des incendies et elles ont historiquement connu moins de changements dans l'utilisation des terres et de suppression des incendies que les forêts de basse altitude.

La région étudiée est d'environ 30 000 km^2 au centre des Rocheuses (voir figure 6). Les paléo-archives sont issues des cernes d'arbre et des sédiments lacustres. Sur la période d'observation récente (1984/2020), la superficie brûlée dans la région a considérablement augmenté, une tendance fortement corrélée au déficit de pression de vapeur moyen entre mai et septembre. Le déficit de pression de vapeur reflète la demande atmosphérique en eau et est étroitement lié à l'augmentation de l'activité des incendies en raison de son influence sur l'aridité des combustibles. La grande majorité (95 %) des incendies depuis 1984 s'est produite après 2000, l'année 2020 représentant à elle seule 44 % de la superficie brûlée au cours de cette période. En grande partie à cause des incendies de grande ampleur de 2020, la période de rotation des incendies au XXIe siècle est désormais de 117 ans, soit près du double du taux moyen des incendies au cours des 2 000 dernières années (les sédiments lacustres indiquent une période de rotation des incendies de 230 ans). Plus frappant encore, les taux de combustion actuels sont désormais supérieurs de 22 % à ceux enregistrés au début de l'anomalie climatique médiévale (MCA, 770 à 870 après J.-C., qui correspond au taux maximal reconstitué au cours des deux derniers millénaires), lorsque les températures de l'hémisphère nord étaient supérieures d'environ 0,3 °C à la moyenne du XXe siècle. La saison des incendies de 2020 illustre ainsi comment les événements extrêmes délimitent de nouveaux régimes d'incendies à mesure que le climat se réchauffe. Les températures du XXIe siècle dépassant désormais celles de la MCA, l'activité incendiaire dans les forêts subalpines des Rocheuses dépasse la fourchette de variabilité qui a façonné ces écosystèmes pendant des millénaires.

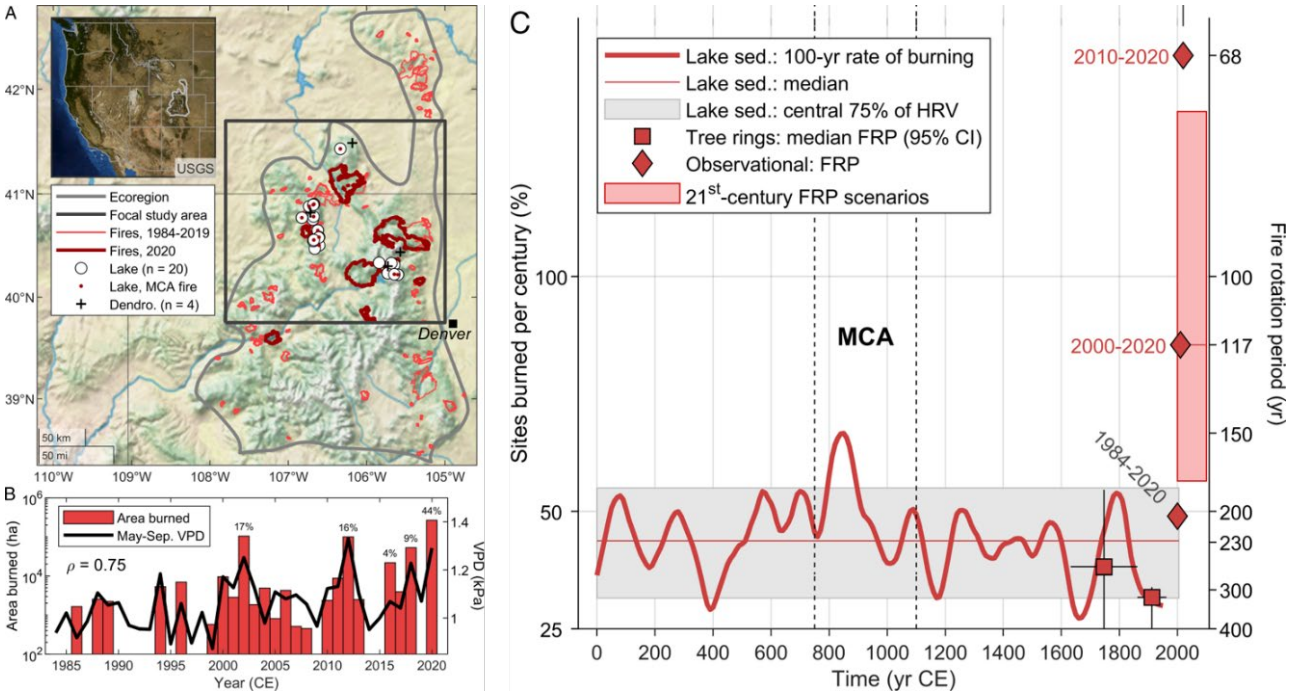


Figure 6 : (A) Carte des Rocheuses centrales et zone d'étude principale, avec les périmètres des incendies de 1984 à 2019 (lignes fines, rouge clair) et de 2020 (lignes épaisses, rouge foncé). Les paléo-données de diverses origines sont aussi indiquées sur la carte. (B) Superficie brûlée à l'intérieur des périmètres d'incendie présentés en (A) et VPD moyen de mai à septembre. Les pourcentages indiqués au-dessus des barres rouges correspondent à la part de la superficie totale brûlée (de 1984 à 2020) attribuable à l'année concernée. (C) Historique des paléo-incendies à partir des sédiments lacustres (pourcentage de sites brûlés par siècle, axe gauche, et paléo-FRP, axe droit), avec la médiane (ligne rouge) et les 75 % centraux de la plage historique de variabilité ; FRP médiane dérivée des cernes des arbres pour les périodes 1611 à 1863 et 1864 à 1944 (carrés rouges), calculée à partir de huit valeurs FRP avec un intervalle de confiance bootstrappé à 95 % ; valeurs FRP contemporaines pour les forêts subalpines dans la zone d'étude focale (losanges rouges) ; et scénarios FRP pour le XXIe siècle, en supposant des taux de brûlage continus entre le taux de 1984 et 2020 (FRP de 204 ans) et le taux de 2010 à 2020 (FRP de 68 ans). D'après P. E. Higuera et al. (2021).

Emily K. Heyerdahl et al. (2001) ont rapporté une étude sur la variation des régimes d'incendies durant plusieurs siècles aux Blue Mountains (dans l'Oregon et l'État de Washington, aux États-Unis). Ils ont montré un point particulier, à savoir que le déclin des incendies vers 1900 était en lien avec les élevages du bétail et l'utilisation des techniques de lutte contre les incendies. Une histoire multi-centenaire de la fréquence, de l'ampleur, de la saisonnalité et de la gravité des incendies a été reconstituée et couvre quatre bassins versants des Blue Mountains. L'influence du climat régional, un facteur de contrôle descendant, a été déduite à partir des variations des régimes d'incendies entre les bassins versants, tandis que l'influence de la topographie locale, un facteur de contrôle ascendant, a été déduite à partir des variations au sein des bassins versants. Avant 1900 environ, les régimes d'incendies variaient entre les bassins versants et au sein de ceux-ci, ce qui suggère que les facteurs de contrôle descendants et ascendants étaient tous deux importants. La présence de variations à l'échelle régionale et locale dans les Blue Mountains suggère que les contrôles descendants et ascendants agissaient simultanément pour influencer les régimes d'incendie dans le passé. Cependant, le déclin brutal de la fréquence des incendies vers 1900 a été beaucoup plus important que toute variation régionale ou locale au cours des siècles précédents et indique que les régimes d'incendie du XXe siècle dans ces bassins versants ont été considérablement affectés par des contrôles supplémentaires tels que le pâturage du bétail et la suppression des incendies.

Jason S. Sibold et Thomas T. Veblen (2006) ont examiné la relation entre le climat et les incendies pour la période historique allant de 1650 à 1978 dans le secteur sud du parc national des Montagnes Rocheuses. L'ensemble de données sur l'historique des incendies a été élaboré à partir d'analyses dendro-écologiques. Au total,

6 152 carottes d'arbres et 676 échantillons de sections transversales de cicatrices d'incendie ont été prélevés sur 487 sites. L'utilisation combinée de l'étendue des parcelles forestières, de l'âge des arbres et des cicatrices d'incendie fournit des informations sur l'ampleur et la gravité des incendies passés, ainsi que sur la résolution annuelle des dates des événements. Les enregistrements climatiques locaux ont été reconstitués à partir des cernes des arbres. Il a été démontré que les années de feux importants sont liées à des conditions de sécheresse extrême et sont étroitement liées à l'ENSO, au PDO et à l'AMO, ainsi qu'à leurs combinaisons de phases à l'échelle interannuelle et centenaire.

Hawkins et al. (2022) ont utilisé un modèle régional du climat à 25 km de résolution spatiale pour l'ouest des États-Unis. Deux simulations ont été effectuées couvrant la période de 2017-2018 (qui a vu plusieurs épisodes de fort incendie) : l'une est censée reproduire le climat factuel et l'autre le climat contrefactuel préindustriel. Il est intéressant de souligner que ces simulations ont été effectuées dans le cadre d'une initiative populaire « Weather at home » avec 1000 réalisations pour chaque configuration. L'indice forêt météo (FWI) est ensuite calculé avec les sorties du modèle, et utilisé pour effectuer l'attribution du danger incendiaire. Les résultats montrent que le changement climatique anthropique actuel a augmenté de 40 % la probabilité d'indices météorologiques extrêmes propices aux incendies dans les régions du nord de la Californie et de l'Oregon. Ces résultats montrent que le changement climatique anthropique exacerbe les conditions météorologiques extrêmes propices aux incendies en automne, qui contribuent à des incendies catastrophiques à fort impact dans les régions peuplées de l'ouest des États-Unis. Conjugué à des facteurs non climatiques tels que l'accumulation de biomasse et l'empiétement des zones habitées sur les terres sujettes aux incendies, cela a accru le risque global d'incendie, motivant l'adoption de systèmes d'adaptation aux feux susceptibles d'atténuer le risque et adaptés à l'écologie du paysage.

Iglesias et al. (2022) ont analysé plus de 28 000 incendies enregistrés dans la base de données *Monitoring Trends in Burn Severity* (MTBS), et ont obtenu des informations intéressantes sur l'évolution des feux aux États-Unis, et utiles pour la réévaluation des efforts de lutte, ce qui permet de définir les priorités d'action et l'allocation stratégique des ressources. Malgré les différences régionales en matière d'humidité effective, de végétation et d'utilisation des terres, le nombre annuel d'incendies entre 2005 et 2018 a presque doublé dans l'Ouest et l'Est et quadruplé dans les Grandes Plaines par rapport à la période 1984-1999. En outre, les incendies individuels dans l'Ouest ont été nettement plus étendus que lors des décennies précédentes. En conséquence, la superficie médiane brûlée chaque année a quadruplé dans l'Ouest et augmenté de 620 % dans les Grandes Plaines. Dans l'Est, si la superficie médiane touchée par les incendies est restée constante, la superficie annuelle brûlée la plus importante (1 %) a doublé. Les différences signalées en termes de superficie annuelle brûlée, de nombre d'événements et de taille des incendies avant et après le changement sont, dans tous les cas, statistiquement différentes de celles générées dans le cadre de l'hypothèse nulle selon laquelle les médianes des deux périodes étaient égales. Parks et Abatzoglou (2020) ont également conclu qu'il y a une augmentation de la sévérité des incendies dans l'Ouest des États-Unis, depuis les années 1980.

L'étude de Yizhou Zhuang et al. (2021) est une étude d'attribution de cause, en relation avec deux incendies historiques qui ont eu lieu en 2020 en Californie : August Complex Fire (Californie du Nord) et California Creek Fire (Californie centrale). Cette étude, en revanche, ne traite pas directement le Camp Fire, un incendie du 8 au 26 novembre 2018 dans le comté de Butte, en Californie. En détruisant notamment la ville de Paradise, il est le plus meurtrier de l'histoire de cet État américain, avec 85 morts, selon le bilan officiel du 3 décembre 2018 (voir Chap. 4, Conséquences). On constate une nette augmentation des incendies dans l'Ouest des États-Unis (WUS) au cours des dernières décennies, comme par exemple dans Parks et Abatzoglou (2020) et Iglesias et al. (2022). Yizhou Zhuang et al. (2021) ont tenté d'attribuer cette tendance afin de déterminer dans quelle mesure elle est due à la variabilité naturelle ou au réchauffement anthropique. L'étude repose sur le déficit de pression de vapeur (VPD) qui est la principale variable météorologique contrôlant les incendies de végétation. Les estimations basées sur les observations suggèrent qu'environ un tiers (32 %) de la tendance du VPD, pour la période 1979-2020 dans l'Ouest des États-Unis pendant la saison chaude (mai à septembre), est attribuable à la variabilité naturelle de la circulation atmosphérique, tandis que les deux tiers environ (68 %) s'expliquent par le réchauffement anthropique. Une autre estimation avec les simulations CMIP6 suggère que le forçage anthropique explique une part encore plus importante de la tendance observée du VPD (88 %) pour la même période

et la même région. En août 2020, lorsque le *August Complex Fire* s'est produit en Californie, le réchauffement anthropique explique 50 % des anomalies VPD. Ces résultats suggèrent que la région ouest des États-Unis semble avoir franchi un seuil critique et que le facteur dominant contrôlant la variation des conditions météorologiques propices aux incendies est passé de la variabilité climatique naturelle au réchauffement anthropique. Si la variabilité climatique naturelle peut encore moduler de manière significative les variations interannuelles à décennales du risque d'incendies, la tendance à l'augmentation du risque devrait se poursuivre dans le futur, ce qui nécessite des mesures d'adaptation et d'atténuation urgentes et efficaces de la part de la société (Voir Chap. 6, Prévention et Chap. 8, Urbanisme, aménagement et gouvernance).

Williams et al. (2019) étudient aussi les feux en Californie avec les données d'observation de 1972 à 2018 et cherchent la relation entre l'augmentation des incendies et le changement climatique. Entre 1972 et 2018, la Californie a vu sa superficie annuelle brûlée quintupler. L'augmentation de la superficie des incendies estivaux est très probablement due à l'augmentation de l'aridité atmosphérique causée par le réchauffement. Depuis le début des années 1970, les journées de la saison chaude se sont réchauffées d'environ 1,4 °C, ce qui a considérablement augmenté le déficit de pression de vapeur atmosphérique (VPD). La réponse de la superficie des incendies au VPD est exponentielle, ce qui signifie que le réchauffement a eu un impact de plus en plus important. Les relations interannuelles solides entre le VPD et la superficie des incendies suggèrent fortement que la quasi-totalité de son augmentation entre 1972 et 2018 est due à l'augmentation du VPD.

Le Camp Fire en novembre 2018 dans le comté de Butte, en Californie, est le plus meurtrier de l'histoire de la Californie, avec 85 morts, selon le bilan officiel du 3 décembre 2018. Le Woolsey Fire s'est produit dans les comtés de Ventura et de Los Angeles en Californie entre le 8 et 21 novembre 2018. La plupart des parcs de la Santa Monica Mountains National Recreation Area et la plage de Malibu ont été fermés. L'incendie a endommagé 88 % des parcs. Parmi les habitations touchées, se trouvent des propriétés de célébrités. D'importants lieux de tournages sont aussi emportés par les flammes. C'est dans ce contexte d'incendies d'automne dévastateurs ces dernières années que l'étude de Goss et al. (2020) a été réalisée. Ces incendies d'automne ont coïncidé avec des conditions météorologiques extrêmes propices aux incendies, caractérisées par des vents offshores violents et une végétation anormalement sèche en raison de conditions climatiques exceptionnellement chaudes et d'un début tardif des précipitations automnales. Goss et al. (2020) ont montré que l'augmentation des températures automnales (~1 °C) et la diminution des précipitations automnales (~30 %) au cours des quatre dernières décennies ont contribué à l'augmentation des indices météorologiques liés aux incendies (+20 %). En conséquence, la fréquence observée des jours d'automne avec des conditions météorologiques extrêmes (95^{e} centile) propices aux incendies, est préférentiellement associées à des incendies automnaux extrêmes, a plus que doublé en Californie depuis le début des années 1980. Compte tenu des graves répercussions sociales de ces incendies, ces conclusions revêtent une importance cruciale pour les efforts actuellement déployés afin de gérer les risques en Californie et dans d'autres régions. Abatzoglou et al. (2017) se sont aussi penchés sur les incendies de l'Ouest des États-Unis. Ils ont conclu que, indépendamment d'autres facteurs, l'augmentation à long terme de l'aridité des combustibles entraînera une augmentation de la sévérité des incendies pour les régimes de végétation existants.

Kumar et al. (2025) ont développé un nouvel indicateur pour quantifier le risque d'incendie. Il s'agit de l'indice intégré centré sur l'humain du risque d'incendie de forêt (IHWRI : *Integrated Human-centric Wildfire Risk Index*). En intégrant l'activité humaine et les impacts du changement climatique, ils offrent une compréhension globale du risque d'incendie centré sur l'humain, un élément crucial pour l'élaboration des politiques. Cet indice est conçu pour intégrer trois éléments clés : l'étendue géographique de l'interface (wildland — urban interface - WUI), qui représente les possibilités géographiques d'allumage d'incendies à impact extrême, le nombre de structures à risque et les jours critiques sur le plan météorologique propices à l'allumage et à la propagation d'incendies à impact extrême. Mathématiquement, l'IHWRI s'exprime comme suit : IHWRI = A × H × D, où : A (Aire fractionnelle de WUI) : nombre de pixels unitaires adjacents à la WUI et inclus dans celle-ci, H (Habitations) : nombre de logements dans la WUI, D (Jours de météorologie propice aux feux) : nombre de jours critiques pour les incendies. Cette formule combine des facteurs spatiaux, structurels et temporels afin de fournir une évaluation complète du risque d'incendie. Cette définition cherche à décomposer le « risque » en trois composantes : Aléa, Exposition, et Vulnérabilité. IHWRI prend en compte les deux premiers facteurs, mais pas la vulnérabilité.

IHWRI = A × H × D, A (Aire fractionnelle de WUI), H (Habitations), D (Jours de météorologie propice aux feux). Ainsi, il est constaté une augmentation de 4,1 fois du risque composite d'incendie en Californie entre 1990 et 2022, les jours de conditions météorologiques critiques pour les incendies (c'est-à-dire les conditions météorologiques propices à une activité incendiaire importante) ayant été multipliés par 2,5, passant de 14 jours en 1990 à 34 jours en 2022. La superficie des zones d'interface (c'est-à-dire les zones où les incendies d'origine humaine sont possibles) a été multipliée par 1,2, passant de 23 772 à 27 756 km^2, et le nombre d'unités d'habitation dans les interfaces (c'est-à-dire susceptibles de subir des pertes dues aux incendies) a été multiplié par 1,4, passant de 3 646 036 à 5 138 055. L'IHWRI a connu la plus forte croissance annuelle moyenne, avec 12 %, tandis que la superficie des interfaces a connu la plus faible augmentation, avec 3,5 %. En évaluant la contribution de chaque facteur, les conditions météorologiques critiques ont représenté 49 % de l'augmentation de l'IHWRI, tandis que la superficie des zones d'interface et la croissance du nombre de logements ont contribué respectivement à hauteur de 23 % et 28 %. Bien que l'IHWRI n'intègre pas directement les facteurs de vulnérabilité, il fournit une base solide pour évaluer le risque global d'incendie, notamment en termes d'impact potentiel et de changements au fil du temps.

L'expansion des interfaces et le changement de régime des feux peuvent tous deux contribuer à l'augmentation du risque d'incendies. Il convient de noter que leur effet combiné dépasse souvent la somme des effets individuels. Ceci est le résultat de l'expansion des interfaces vers les régions de risque plus grand, par rapport aux interfaces existantes. L'étude de Zhi Hua Liu et al. (2015) évalue les multiples facteurs déterminants du risque futur d'incendie dans la chaîne du Front Range, au Colorado, à l'aide d'un modèle couplé tenant compte de l'expansion de l'interface et de l'évolution du régime des incendies sous l'influence du climat. En intégrant l'expansion de l'interface, les changements de couverture et d'occupation des sols, la dynamique de la végétation et la propagation des feux dans un cadre unifié, le modèle est capable de prendre en compte les rétroactions et les interactions entre ces processus concomitants. Les zones d'interface futures devraient présenter un taux de combustion plus élevé que les interfaces existantes. En raison de cette expansion des interfaces vers des zones plus exposées aux incendies, la croissance de celles-ci et le changement du régime des feux ont un effet synergique : leur influence combinée sur le taux de combustion dans les zones d'interface s'avère supérieure à la somme de leurs effets respectifs.

Wang et al. (2025) (avec commentaires de Gan [2025]) publient une étude sur la sévérité des incendies (*Burn Severity*, une mesure des changements induits par le feu dans la végétation et le sol) dans les forêts canadiennes, sur une période de 40 ans (1981 à 2020). Ce travail utilise des modèles de régression logistique multinomiale (MLR) afin d'estimer la sévérité des incendies à partir de données de télédétection pour 10 écozones canadiennes. Les valeurs dNBR (*differenced normalized burn ratio*) ont été classées en trois catégories de sévérité (faible, modérée et élevée) et utilisées comme variable dépendante (cible). Trois groupes de prédicteurs ont été utilisés, les conditions météorologiques quotidiennes quantifiées par les indices du Système canadien d'indices météorologiques de feu (CFWIS), les variations topographiques et les caractéristiques du combustible. L'importance relative des prédicteurs dans les modèles a été dérivée afin d'identifier les principaux facteurs déterminants de la sévérité des incendies. Les résultats montrent que l'aridité du combustible était le facteur le plus influent, que les mois d'été étaient plus propices aux grands incendies et que les régions nordiques étaient les plus touchées par les changements climatiques. Environ 6 % (0,54 à 14,64 %) des zones considérées présentent une augmentation significative du nombre de jours propices à des incendies de grande sévérité entre 1981 et 2020, la plupart d'entre eux ayant été observés entre 2001 et 2020, au printemps et à l'automne. La saison des incendies exceptionnelle de 2023 a présenté des structures spatiales similaires, mais avec une aggravation plus généralisée de la sévérité des incendies.

3.2.3. Sud-est de l'Australie

Tout comme la Californie, le sud-est de l'Australie présente aussi de fortes caractéristiques du climat méditerranéen, donc sujet au fort danger des incendies de végétation. L'étude de Josep Peñuelas et al. (2021) fournit une bonne référence pour y décrire la situation et affirme que l'augmentation des feux est liée au changement climatique.

De nombreuses études ont montré une augmentation du risque d'incendie due aux changements climatiques survenus au cours des dernières décennies en Australie, l'empreinte du changement climatique sur les incendies individuels et les tendances, et une augmentation prévue du risque d'incendie dans le cadre du changement climatique futur en raison de l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Bien que ces études indiquent des conditions météorologiques plus dangereuses dans un monde plus chaud, elles suggèrent également que les tendances dues au changement climatique pourraient ne pas être clairement détectables avant plusieurs décennies en raison de la forte variabilité naturelle et des extrêmes du climat australien. Josep Peñuelas et al. (2021) ont analysé les tendances de la superficie brûlée dans les écosystèmes forestiers en Australie, qui sont dominés par des forêts tempérées s'étendant sur les régions sud et est du continent. Ils ont utilisé un enregistrement satellite haute résolution (1,1 km x 1,1 km) des zones brûlées disponible sur la base du NOAA-AVHRR (32 ans), les zones brûlées du NASA-MODIS à une résolution de 500 m (19 ans) et les historiques des incendies des agences gouvernementales des États et des territoires (90 ans). En outre, ils analysent les tendances de neuf facteurs de risque d'incendie et indices liés aux caractéristiques des charges combustibles, aux conditions météorologiques propices aux incendies, aux comportements extrêmes du feu et à l'inflammation, qui, associés aux zones brûlées, permettent de déduire l'influence causale du changement climatique sur l'activité des incendies. Les zones brûlées dans les forêts australiennes affichent une tendance annuelle positive linéaire, avec des augmentations en toutes saisons et la plus grande variabilité interannuelle pendant l'été. La croissance de la superficie brûlée est exponentielle pour la période automne-hiver, bien que les contributions saisonnières absolues les plus importantes à cette augmentation aient été enregistrées au printemps et en été. Ces tendances montrent un allongement de la saison des incendies vers les saisons plus fraîches. La fréquence des années de méga-incendies dans les forêts où plus de 10 000 km^2 (1 Mha) ont été brûlés a considérablement augmenté depuis 2000, entraînant une diminution du nombre d'années depuis le dernier incendie (YSLF). Les valeurs moyennes du YSLF au cours des quatre dernières décennies restent dans les limites des régimes historiques d'incendie, mais on observe une tendance à la hausse du nombre de pixels dans lesquels le YSLF diminue. La poursuite de cette tendance, en particulier dans les zones abritant des espèces sensibles, pourrait entraîner des changements écologiques importants. Si les incendies étaient de forte intensité et entraînaient la mortalité des arbres, l'écosystème risquerait de s'effondrer localement. Il est également démontré qu'il existe une tendance à la hausse des conditions météorologiques très dangereuses pour les incendies, sur la base de l'indice FFDI pour les conditions proches de la surface et de l'indice C-Haines pour la stabilité atmosphérique verticale de la troposphère inférieure à moyenne et les mesures d'humidité pertinentes pour les processus pyroconvectifs. Il existe de fortes corrélations entre ces indices météorologiques, les changements climatiques à long terme et les éclairs secs, d'une part, et l'augmentation de la superficie des forêts brûlées, d'autre part. Ces corrélations multiples et individuelles établissent un lien solide et multiforme entre le changement climatique et l'augmentation de l'activité des incendies au cours des trois dernières décennies. L'augmentation des températures et les changements dans les régimes pluviométriques à grande échelle ont très probablement joué un rôle prépondérant dans les tendances observées en matière de superficie brûlée.

3.2.4. Europe et Méditerranée

L'Europe du sud et le pourtour de la Méditerranée constituent une région géographique très active pour les incendies de végétation. Les conditions météorologiques de l'été chaud et sec sont propices aux feux, si, bien sûr, les combustibles sont disponibles et suffisamment secs, ce qui exige une certaine structure spatio-temporelle des pluies en quantité et en cycle saisonnier. L'évolution récente de l'activité incendie en Europe s'accompagne d'une modification progressive des conditions météorologiques favorables aux incendies. L'augmentation des températures, de l'évapotranspiration et de la fréquence des sécheresses favorise des situations caractérisées par des combustibles fortement desséchés et des niveaux élevés de danger incendie (Abatzoglou, Williams, et Barbero 2019 ; Pausas et Keeley 2021). En région méditerranéenne, cette évolution se traduit notamment par un allongement de la période durant laquelle les conditions météorologiques sont propices aux incendies (Pausas et Keeley 2021).

On peut tout d'abord évoquer quelques événements très médiatiques sur le pourtour méditerranéen dont l'ampleur d'impact était très importante.

Koutsias et al. (2012) décrit la répartition spatiale et les facteurs environnementaux à l'origine des incendies de grande ampleur qui ont ravagé le Péloponnèse, en Grèce, en 2007. Ces incendies ont atteint un nouveau record en termes de superficie brûlée (225 734 ha) depuis 1980. La majorité des incendies de 2007 ont ravagé des écosystèmes inflammables situés à basse altitude et dans des zones à forte incidence d'incendies. Cependant, un certain nombre d'incendies se sont propagés à des écosystèmes non inflammables situés à haute altitude, dans des zones plus fraîches et dans des zones à faible incidence d'incendies qui n'avaient jamais été touchées auparavant. La proportion plus importante de zones humides et sub-humides brûlées, ainsi que la proportion plus faible de zones semi-arides brûlées par rapport à l'histoire récente, reflètent un changement important clairement lié aux conditions météorologiques. La conclusion la plus importante est probablement le changement observé dans les types de végétation naturelle brûlée et les conditions météorologiques dominantes. L'effet synergique du combustible et des conditions météorologiques peut expliquer les incendies de forêt catastrophiques qui ont ravagé le Péloponnèse en 2007. Cependant, la proportion plus importante de zones humides et sub-humides brûlées par rapport à la proportion plus faible de zones semi-arides brûlées pourrait indiquer un changement dans le schéma des incendies. Ces schémas pourraient indiquer des changements climatiques dans le régime des incendies favorisé par l'accumulation de combustible, ce qui pourrait avoir des implications écologiques majeures si cela se vérifie.

Célia M. Gouveia et al. (2016) montrent que le centre et le nord de la péninsule du Péloponnèse sont devenus les zones les plus sensibles aux incendies en raison de l'effet combiné de deux événements météorologiques extrêmes, la sécheresse et les vagues de chaleur, ce qui a été confirmé par l'emplacement des principales zones brûlées pendant la saison des incendies de 2007. En outre, l'analyse a montré que pendant les jours d'activité extrême des incendies en 2007, une forte advection nordique d'air très chaud et sec sur la région a favorisé leur survenue. Il existe des effets synergiques entre la disponibilité du combustible et les conditions météorologiques qui ont créé des conditions extraordinaires pour la propagation des incendies. La dynamique de la végétation est liée aux événements climatiques extrêmes qui se sont produits pendant ces périodes. On observe une incidence plus élevée des incendies dans les zones où l'activité et la densité de la végétation sont plus importantes. Il semble que les grandes zones brûlées lors de la saison des incendies de 2007 dans la péninsule du Péloponnèse soient plus sensibles à la disponibilité du combustible et à la densité de la végétation qu'à la sécheresse de la végétation.

Giannaros et al. (2022) propose une description événementielle d'un épisode de feux en Grèce en 2021. Les incendies qui ont ravagé la Grèce début août 2021 ont été sans précédent en termes d'ampleur, d'intensité et d'impacts. Dans un contexte plus large, les incendies extrêmes, y compris les événements pyroconvectifs, se développent à travers des processus se produisant à plusieurs échelles spatiales et temporelles, au cours desquels des seuils consécutifs sont dépassés. On estime que quatre contraintes environnementales principales, ou « déclencheurs », contrôlent la survenue des incendies de forêt majeurs. Ces déclencheurs sont les suivants : (a) l'accumulation de combustibles à un niveau favorisant la propagation du feu, (b) le dessèchement des combustibles permettant l'inflammation et le maintien de la combustion, (c) une source d'inflammation (par exemple, la foudre, un incendie criminel) et (d) des conditions météorologiques favorables à la propagation du feu. Par conséquent, les facteurs qui ont contribué aux récents incendies extrêmes en Grèce doivent être recherchés dans la combinaison (1) des conditions météorologiques antérieures qui ont permis l'accumulation et le dessèchement extrême des combustibles et (2) des conditions météorologiques défavorables concomitantes qui ont permis aux incendies déclenchés de se coupler à l'atmosphère et d'évoluer vers des événements pyroconvectifs extrêmes. L'analyse des conditions environnementales qui ont conduit à l'épidémie de pyroconvection début août 2021 en Grèce démontre que ces incendies résultent d'une série d'événements qui ont essentiellement augmenté le potentiel d'occurrence d'une pyroconvection extrême.

Ces incendies comptent parmi les événements les plus désastreux de ces 13 dernières années, ayant ravagé une superficie totale équivalente à près de trois fois la moyenne annuelle des zones brûlées dans le pays entre 2008 et 2020. Ils constituent des cas de comportement extrême du feu, principalement caractérisés par la présence d'une pyroconvection intense et persistante. Le déclenchement des événements examinés est associé à des conditions météorologiques qui, d'une part, ont contribué à rendre les combustibles extrêmement inflammables, favorisant ainsi une combustion intense, et, d'autre part, ont créé un environnement à méso-échelle propice au

développement de la pyroconvection. L'étendue et la gravité de ces incendies de forêt n'étaient pas surprenantes compte tenu du potentiel météorologique d'incendie pour la période où ils se sont déclarés. À cet égard, les auteurs soutiennent qu'une surveillance continue des conditions favorisant un comportement extrême du feu est impérative pour améliorer la capacité de la Grèce à faire face aux incendies de forêt extrêmes.

L'étude de Koutsias et al. (2013) présente les résultats d'une analyse statistique portée sur la relation entre climat-météo et les feux en Grèce. Elle met en perspective cette relation climat-feux sur une échelle longue de plus d'un siècle. Les enregistrements historiques des incendies et les observations météorologiques en Grèce, couvrant plus d'un siècle (1894-2010), sont rassemblés et étudiés pour fournir des associations incendie-météo à long terme. La disponibilité de ces données historiques offre une occasion unique d'étudier les interactions à long terme entre les incendies et la météo au cours du siècle dernier dans une région méditerranéenne. Afin d'isoler la variabilité des régimes d'incendie imposée par la situation socio-économique, la période d'étude totale a été divisée en trois fenêtres temporelles. L'analyse des tendances a révélé une augmentation statistiquement significative du nombre d'incendies et de la température de l'air, en particulier après le milieu des années 1970. La fréquence des incendies, exprimée par le nombre annuel d'incendies et la superficie totale brûlée, était fortement corrélée à la température maximale moyenne et à la température maximale absolue de l'air qui, à son tour, était liée à l'occurrence des vagues de chaleur estivales. La superficie totale brûlée était également fortement corrélée négativement avec les précipitations pendant la saison des incendies et positivement avec les précipitations annuelles et estivales décalées de deux ans, ce qui souligne l'effet des précipitations sur le contrôle de la production et de l'humidité des combustibles. Ces résultats soutiennent l'argument selon lequel, bien que les précipitations totales décalées annuellement puissent avoir un effet marginal sur le risque d'incendie en influençant la production et l'accumulation de biomasse, les paramètres météorologiques décalés sont les principaux moteurs de la propagation des incendies en contrôlant directement l'humidité des combustibles.

Turco et al. (2016) ont analysé les tendances récentes en matière d'incendies au Portugal, en Espagne, dans le sud de la France, en Italie et en Grèce, à l'aide d'une base de données homogénéisée intégrant les statistiques officielles fournies par plusieurs agences nationales/européennes. Au cours de la période 1985-2011, la superficie totale brûlée (BA) chaque année a affiché une tendance générale à la baisse, sauf au Portugal, où un signal hétérogène a été observé. En considérant l'ensemble des pays, la BA a diminué d'environ 3020 km^2 au cours de la période d'étude de 27 ans (soit environ -66 % de la valeur historique moyenne). Des résultats globaux similaires ont été observés pour le nombre annuel d'incendies (NF), qui a diminué d'environ 12 600 au cours de la période étudiée (environ -59 %), à l'exception de l'Espagne où, à l'exclusion des provinces situées le long de la côte méditerranéenne, une tendance à la hausse a été observée sur une période plus longue. Les auteurs estiment que les tendances négatives peuvent s'expliquer, au moins en partie, par un effort accru en matière de gestion et de prévention des incendies après les grands incendies des années 1980, tandis que les tendances positives peuvent être liées aux récentes transformations socio-économiques conduisant à des configurations de paysage plus dangereuses, ainsi qu'au réchauffement observé au cours des dernières décennies.

Dans un article publié en 1998, Josep Piñol et al. (1998) étudient la relation entre les indicateurs déduits des variables météo et du sol, et les incendies sur la côte méditerranéenne de l'Espagne (de Valence à Barcelone). Ils n'ont pas utilisé l'indicateur FWI, mais deux indicateurs qu'ils ont élaborés eux-mêmes à partir des données météorologiques. Le premier indice est une estimation de l'humidité et l'inflammabilité des combustibles morts fins. Tandis que le deuxième indice est plus étroitement lié à l'humidité des combustibles vivants fins. Les deux indices de risque d'incendie ont augmenté au cours de la période historique allant de 1941 à 1994, en raison de l'augmentation de la température maximale quotidienne moyenne et de la diminution de l'humidité relative minimale quotidienne. Ces tendances ont été observées tant dans les valeurs moyennes des indices que dans le nombre de jours à très haut risque. Les données annuelles sur le nombre d'incendies de forêt et la superficie brûlée montrent également une augmentation entre 1968 et 1994, et sont fortement corrélées aux deux indices de risque d'incendie. Bien que d'autres causes non météorologiques (par exemple, les activités humaines, l'accumulation de combustible) aient probablement contribué à l'augmentation observée des incendies, cette relation confirme l'effet du réchauffement climatique sur la survenue de ces derniers.

Pausas (2004) examine la relation entre les incendies et le climat dans la province de Valence, une région côtière méditerranéenne en Espagne. Les données couvrent la période de 1968 à 2000. Le nombre d'incendies a

considérablement augmenté dans la zone étudiée, avec environ 16 incendies supplémentaires par an. La superficie annuelle brûlée au cours de la même période présente une grande variabilité interannuelle, avec deux pics marqués en 1978/79 (environ 80 000 ha chaque année) et en 1994 (140 000 ha en une seule année). Les températures ont clairement augmenté au cours de la période étudiée. À l'échelle régionale, l'augmentation moyenne est d'environ 0,35 °C par décennie, ce qui est similaire à l'évolution observée en France. Bien que les précipitations n'aient pas changé de manière significative, les variations de température suggèrent une augmentation de l'évapotranspiration et donc des conditions plus sèches pour les plantes. De telles conditions impliquent une diminution de l'humidité du combustible et une augmentation conséquente du risque d'incendie, ce qui peut expliquer en partie l'augmentation du nombre d'incendies et de la superficie brûlée observés. Pour la période étudiée, la variabilité interannuelle de la superficie brûlée était significativement liée aux précipitations estivales, c'est-à-dire que lors des étés humides, la superficie brûlée était inférieure à celle des étés secs. En outre, les précipitations estivales étaient significativement corrélées à la superficie brûlée en été avec un décalage de deux ans, ce qui suggère que des précipitations élevées peuvent augmenter la charge combustible qui brûle deux ans plus tard.

Pausas et Fernández-Muñoz (2012) ont compilé l'historique des incendies sur 130 ans (1873-2006) toujours dans la province de Valence à partir de statistiques d'inventaire contemporaines, d'anciens dossiers de l'administration forestière et de journaux. Ils ont également compilé des recensements sur la population rurale et des données climatiques pour la même période afin d'évaluer le rôle du climat et des changements de combustible induits par l'homme sur le changement du régime des incendies. Les résultats suggèrent qu'un changement majeur du régime des incendies s'est produit au début des années 1970, avec une augmentation de la fréquence annuelle des incendies (qui a doublé) et de la superficie brûlée (d'environ un ordre de grandeur). Le principal facteur à l'origine de ce changement a été l'augmentation de la quantité et de la continuité des combustibles due à l'exode rural (accumulation de végétation et de combustibles après l'abandon des exploitations agricoles), ce qui suggère que les incendies étaient limités par les combustibles avant les années 1970. Les conditions climatiques étaient peu liées aux incendies avant les années 1970 et fortement liées aux incendies après les années 1970, ce qui suggère que les incendies sont actuellement moins limités par le combustible et davantage liés à la sécheresse qu'avant les années 1970. Ainsi, le changement de régime des incendies implique également un changement dans le principal facteur déterminant de l'activité incendiaire.

Le terme « pyroclimat » est utilisé dans Thibaut Fréjaville et Thomas Curt (2015) pour définir, au niveau régional, des entités géographiques présentant des caractéristiques homogènes en termes de régime des incendies, de conditions climatiques et de tendances temporelles de ces deux éléments. Thibaut Fréjaville et Thomas Curt (2015) ont évalué la diversité des pyroclimats dans le sud-est de la France, une région avec de larges gradients climatiques, végétatifs et anthropiques sur une superficie relativement réduite. Les auteurs ont examiné comment les principales composantes du régime des incendies, du climat et du risque d'incendie ont évolué au niveau régional au cours des quatre dernières décennies. Les analyses ont indiqué que les schémas spatio-temporels du régime des incendies, des conditions météorologiques propices aux incendies et du climat divisaient le sud-est de la France en trois grandes régions pyroclimatiques comprenant 10 sous-régions. Ces régions présentent des combinaisons contrastées de climat et d'incendies, allant des montagnes maritimes à forte propension aux incendies aux plaines et contreforts méditerranéens à propension modérée aux incendies et des montagnes tempérées peu exposées aux incendies. Les tests de tendance de Mann-Kendall ont révélé de fortes hétérogénéités spatiales dans la dynamique temporelle de ces caractéristiques. Étonnamment, l'activité des incendies n'a pas changé au cours des dernières décennies ou a fortement diminué dans les régions les plus exposées aux incendies et augmenté dans les montagnes moins exposées.

Ricardo M. Trigo et al. (2016) ont aussi présenté une étude pour étudier les régimes d'incendies au niveau régional. Leur travail porte sur le secteur géographique ibérique. Ils se concentrent sur la variabilité spatio-temporelle des surfaces brûlées (BA) à l'aide d'un ensemble de données fusionnant les BA enregistrées dans 66 régions administratives du Portugal et de l'Espagne, pour la période 1980-2005. Ils ont appliqué une analyse par grappes afin d'identifier les régions plus vastes présentant des régimes d'incendie similaires. Quatre clusters (nord-ouest NW, nord N, sud-ouest SW et est E) ont été identifiés et leurs structures spatiales et régimes saisonniers se sont avérés liés à des facteurs contraignants tels que la topographie, la couverture végétale et les

conditions climatiques. Le NW regroupe la moitié nord du Portugal et l'extrême nord-ouest de l'Espagne, y compris la plupart des régions administratives (RA) présentant les valeurs moyennes annuelles de BA les plus élevées. Le SW représente les zones sud et intérieures du Portugal, ainsi que de nombreuses RA du centre et du sud-ouest de l'Espagne. Les RA côtières et pré-côtières à l'est de Gibraltar correspondent à l'E (y compris les îles Baléares). Enfin, le N correspond aux régions situées dans les secteurs montagneux du nord de l'Espagne (y compris les Asturies, la Cantabrie et le Pays basque). Les quatre régions présentent un cycle annuel clair de la surface brûlée normalisée.

Calheiros et al. (2020) ont utilisé un ensemble de données actualisé (1980 à 2015) sur les zones brûlées dans la péninsule ibérique. Les résultats sont proches de ceux obtenus par Ricardo M. Trigo et al. (2016). Les pyro-régions développées à partir des données de 1980 à 2005 restent essentiellement inchangées sur cette plus longue période, confirmant les quatre régimes d'incendie dans la péninsule ibérique.

Fréjaville et Curt (2017) exploitent aussi l'idée que les effets anthropiques (changements régionaux dans l'utilisation des terres, les départs de feu ou la suppression) peuvent annuler et dépasser les effets du climat sur les incendies. La méthodologie est identique à celle de Turco et al. (2014). Les relations entre le feu et le climat peuvent être résumées en considérant deux effets antagonistes. La rareté des conditions humides limite l'activité du feu dans les écosystèmes secs en raison d'un manque de disponibilité du combustible (régime d'incendie limité par le combustible), tandis que dans les écosystèmes humides, la rareté des conditions sèches empêche le combustible d'être suffisamment sec (régime d'incendie motivé par la sécheresse) pour soutenir la propagation du feu. Cet effet antagoniste se manifeste également à l'échelle pluriannuelle par l'alternance de conditions humides et sèches qui favorisent les incendies, en augmentant la quantité de combustible fin dans la litière, les herbes et les arbustes pendant les périodes humides, qui brûlent plus intensément pendant les périodes sèches suivantes. Par conséquent, des conditions plus sèches dans un climat plus chaud peuvent avoir des effets antagonistes sur les incendies, selon que les régimes d'incendies limités par les combustibles ou alimentés par la sécheresse dominent, comme par exemple dans les écosystèmes méditerranéens où les deux sont présents. Les résultats ont révélé que dans les écosystèmes euro-méditerranéens, l'influence du climat sur les incendies ne se limitait pas à l'occurrence et à la durée de la sécheresse au cours d'une année donnée, mais qu'un mélange de régimes d'incendies alimentés par la sécheresse et limités par le combustible fonctionnait, soulignant les effets décalés des périodes chaudes ou humides sur les incendies.

Identifier les facteurs qui déterminent la répartition spatiale des incendies est l'un des défis les plus complexes auxquels est confrontée la science du feu dans un monde en mutation. Ruffault et Mouillot (2017) ont étudié l'influence relative de l'activité humaine, de la couverture végétale et des conditions météorologiques sur la répartition régionale des incendies dans une région méditerranéenne française. Dans cette région, le régime des incendies est dominé par des feux de cime typiques de la Méditerranée dans les zones arbustives et les forêts mixtes de chênes et de pins. Les auteurs ont utilisé un algorithme d'apprentissage automatique pour prendre en compte sept variables explicatives décrivant les structures spatiales des facteurs humains, combustibles et météorologiques. Il a été constaté que les facteurs déterminants de la distribution spatiale des incendies suivaient un modèle dépendant de la taille des incendies, dans lequel les activités humaines déterminaient principalement la distribution de tous les incendies, tandis que la continuité et le type de combustibles contrôlaient principalement l'emplacement des incendies les plus importants. La structure spatiale des conditions météorologiques propices aux incendies a été estimée responsable en moyenne de 25 % des feux, ce qui suggère que le changement climatique pourrait avoir une incidence directe sur les schémas spatiaux des risques d'incendie dans un avenir proche. Ces résultats améliorent la compréhension des contrôles à long terme de la répartition spatiale des incendies de végétation, et les cartes prévisionnelles des risques d'incendie fournissent des informations utiles pour les mesures de gestion.

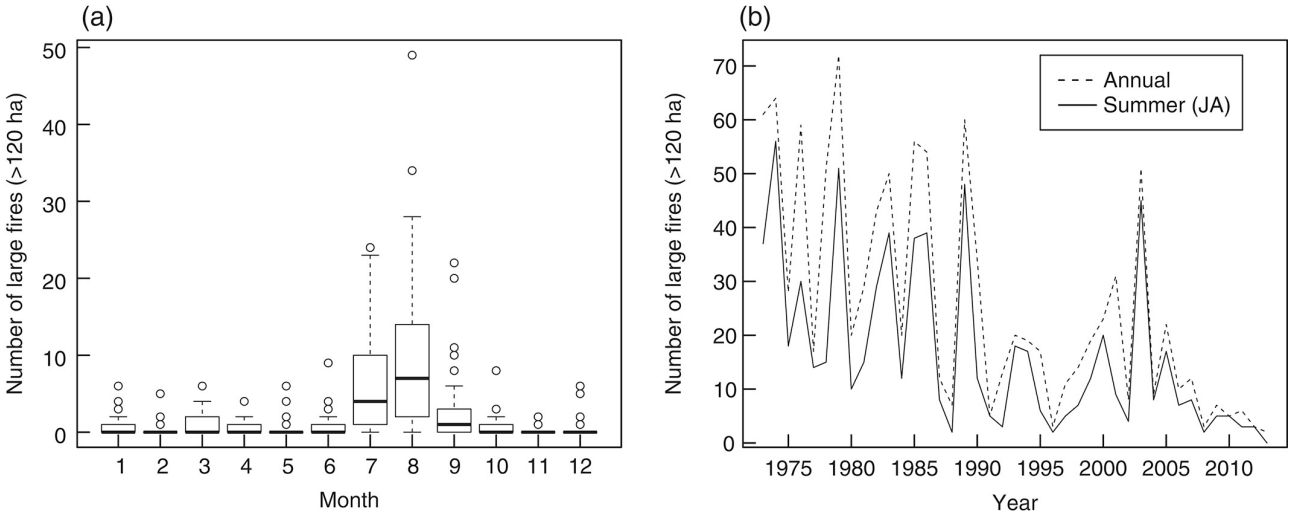


Figure 7 : Statistiques sur les grands incendies (> 120 ha, LF) dans le sud-est de la France pour la période 1973-2013. (a) Nombre annuel d'incendies (lignes continues, axe de gauche) et superficie totale brûlée par ces feux (lignes discontinues, axe de droite) dans l'ensemble de la zone d'étude. (b) Même chose que pour le panneau supérieur, mais pour les feux de plus de 1 000 ha uniquement. Les lignes horizontales correspondent aux valeurs médianes. Les lignes en pointillés indiquent les tendances significatives au seuil de 0,05. D'après Ruffault et al. (2017).

Ruffault et al. (2017) est une tentative de relier les incendies du sud-est de la France avec les régimes synoptiques de circulation atmosphérique. Mais il semble que c'est quand même moins précis que les indicateurs plus locaux (FWI ou IFM, par exemple) pour prévoir les incendies. D. Xavier Viegas et al. (1999) comparent plusieurs indicateurs (construits avec des variables météorologiques) pour trouver les meilleurs possédant une capacité de corrélation avec les incendies en Europe du Sud. Le système canadien a montré une bonne performance pour indiquer le danger d'incendies en relation avec les conditions météorologiques pour cette région. Dans le contexte de la Toscane en Italie, et de Thessalonique, Athènes et Héraklion en Grèce (Good et al. 2008), il a été montré que le FWI fournit des informations relativement cohérentes pour différents endroits et suggère des seuils FWI utiles indiquant un danger d'incendie élevé et extrême. Ruffault et al. (2017) ont analysé les conditions météorologiques synoptiques et locales quotidiennes associées à la survenue de grands incendies estivaux dans le sud de la France entre 1973 et 2013 (voir figure 7). Les liens entre la survenue de grands incendies et les conditions synoptiques sont analysés. Les résultats révèlent un régime d'incendies dominé par le vent, c'est-à-dire que les conditions de vent sont le principal facteur expliquant pourquoi les incendies prennent de l'ampleur, bien que des variations temporelles et spatiales importantes soient observées. Ainsi, la plupart des LF se produisent sous le type de temps « Dorsale Atlantique »

Dans le sud de la France, les grands incendies ont des répercussions socio-économiques et environnementales importantes. Ganteaume et Barbero (2019) ont utilisé une série chronologique géoréférencée à long terme (1958-2017) (Voir figure 8) pour analyser la répartition spatiale et temporelle des grands incendies (LF, supérieur à 100 ha). La région a été touchée jusqu'à six fois par des LF récurrents dans certaines localités et 21 % de la superficie totale brûlée par les LF se trouvait sur une surface qui avait déjà brûlé dans le passé, ce qui pourrait avoir un impact sur la résilience des écosystèmes. On constate des schémas contrastés entre l'est et l'ouest de la zone d'étude, le premier connaissant moins de LF mais d'une plus grande ampleur que le second, avec un intervalle moyen entre les LF dépassant 4 000 ha < 7 ans, principalement dans la zone côtière orientale et > 50 ans dans l'ouest. Ce gradient longitudinal dans le niveau de retour des incendies contraste avec ce à quoi nous pourrions nous attendre compte tenu des conditions météorologiques moyennes, qui diminuent fortement vers l'est pendant la saison des incendies, mais il est cohérent avec la couverture combustible plus importante à l'est, soulignant le rôle important de la continuité du combustible dans la propagation des feux. De plus, l'analyse confirme la forte diminution de la fréquence des LF et de la superficie brûlée au début des années 1990, due à l'efficacité des mesures de lutte contre les incendies et de prévention renforcées à cette époque, affaiblissant ainsi la relation fonctionnelle entre le climat et les incendies dans toute la région.

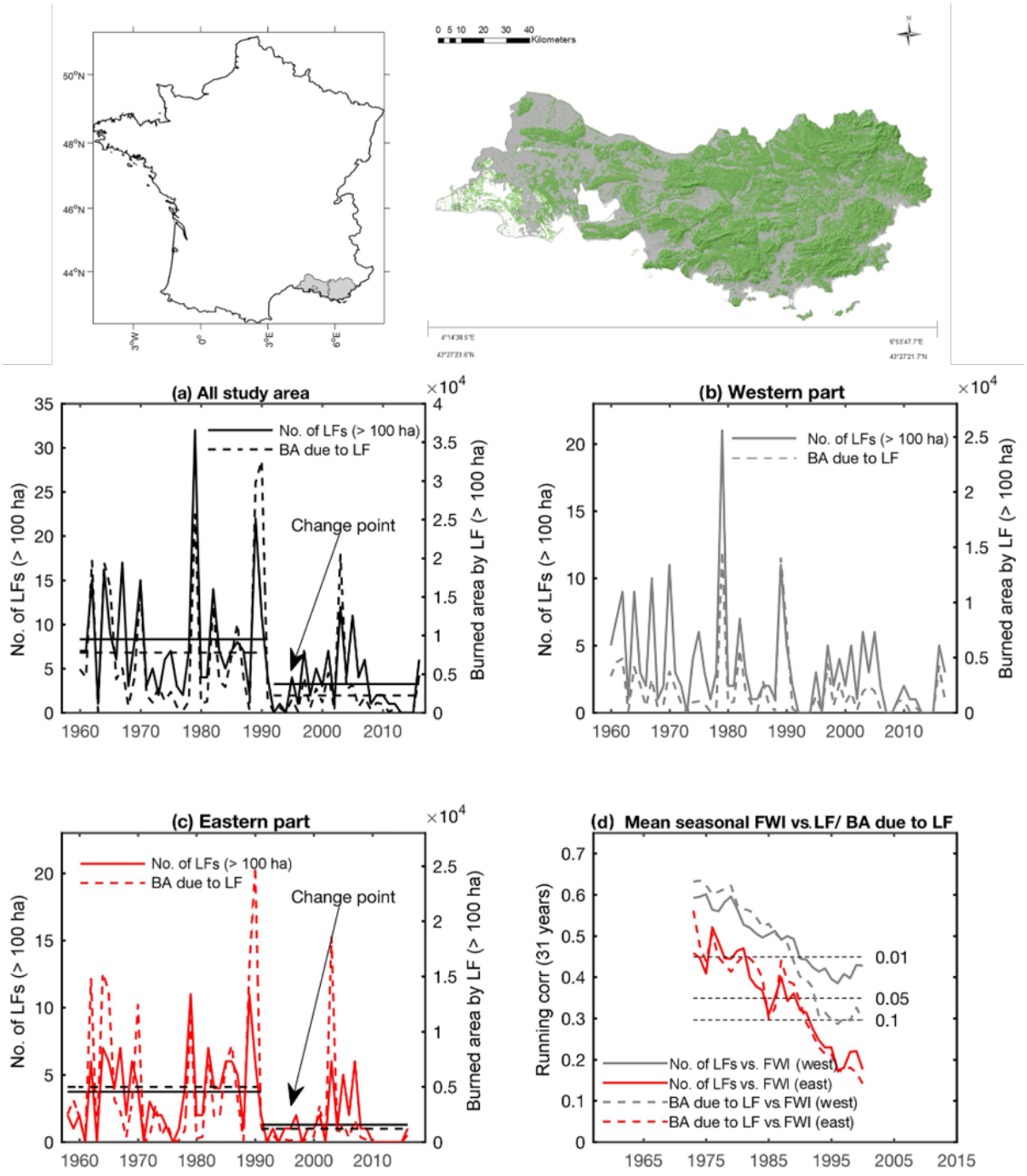


Figure 8 : (a) Nombre annuel d'incendies (ligne continue, axe de gauche) et superficie brûlée par ces feux (lignes pointillées, axe de droite) dans l'ensemble de la région d'étude. Le point de changement significatif au niveau de confiance de 5 % selon un test d'homogénéité est indiqué. Les lignes horizontales indiquent la moyenne globale observée avant et après le point de changement. (b et c) Identiques à (a), mais pour la partie occidentale et orientale, respectivement. (d) Corrélations glissantes sur des fenêtres de 31 ans entre l'indice FWI moyen de juin à septembre et la fréquence annuelle des incendies de forêt (lignes pleines) ainsi que la superficie annuelle brûlée par ces incendies (lignes pointillées) dans les parties occidentale (grise) et orientale (rouge). Les lignes horizontales en pointillés indiquent les différents niveaux de significativité des corrélations de Pearson. Les corrélations sont indiquées pour le milieu des fenêtres glissantes. D'après Ganteaume et Barbero (2019).

Urbieta et al. (2019) ont analysé l'évolution des incendies en Espagne entre 1980 et 2013. Les résultats confirment la tendance de baisse des feux, tandis que les conditions météorologiques favorables aux incendies augmentent. Les incendies dans la plupart des provinces espagnoles sont en baisse, en nombre, en superficie brûlée, en taille moyenne, et également en ce qui concerne la taille des plus grands incendies. Les feux touchent davantage les zones dépourvues d'arbres que les zones boisées. De plus, les forêts de Pinus brûlent moins, tandis que celles de Quercus brûlent davantage. Cette évolution s'est produite malgré l'augmentation des

facteurs de risque d'incendie : les conditions météorologiques sont devenues plus extrêmes et les paysages plus dangereux, en raison d'un couvert forestier plus étendu. La diminution de l'activité des incendies s'explique en grande partie par l'augmentation des moyens de lutte, notamment aériens, qui ont affiché des tendances positives.

Ruffault et al. (2018) ont analysé les conditions météorologiques associées aux incendies de forêt extrêmes qui se sont produits dans le sud de la France pendant les étés exceptionnellement secs de 2003 et 2016. Ils ont identifié que ces incendies étaient liés à deux changements distincts, vers des conditions météorologiques qui n'avaient pas été explorées auparavant et qui résultaient d'interactions spécifiques entre différents types de sécheresse et différents types de conditions météorologiques propices aux incendies. En 2016, une « sécheresse de pression » de longue durée a intensifié les incendies attisés par le vent. En 2003, une « sécheresse chaude » combinant une vague de chaleur et une sécheresse a intensifié les incendies induits par la chaleur.

Sylvain Dupire et al. (2017) ont utilisé les données de 1959 à 2015 pour étudier l'évolution du risque d'incendie dans les Alpes françaises. Ils ont analysé les variations spatiales et temporelles en termes d'intensité, de fréquence, de saisonnalité et de fenêtre d'opportunité de deux indices météorologiques liés aux incendies : le code d'humidité des combustibles fins (FFMC) et l'indice météorologique des incendies (FWI), qui mesurent respectivement la teneur quotidienne en eau de la végétation et le danger potentiel. Les résultats ont montré un contraste important entre les Alpes du Sud, qui présentent un risque météorologique d'incendie élevé en moyenne et une augmentation significative au cours des dernières décennies, et les Alpes du Nord, qui présentent un risque faible à modéré en moyenne et qui n'a augmenté qu'à basse altitude.

3.3. Attribution des événements incendiaires extrêmes

3.3.1. Attribution avec un cadre statistique formel

Les études sur l'attribution des événements extrêmes nécessitent le calcul de deux probabilités d'occurrence dans le monde factuel (avec l'effet du changement climatique anthropique, p1) et dans le monde contrefactuel (sans le changement climatique anthropique, p0). La variation entre p0 et p1 peut être évaluée par deux paramètres. Le premier est la fraction de risque attribuable (FAR : *Fraction of Attributable Risk*), FAR = (p1 – p0)/p1, indique donc dans quelle mesure la probabilité de l'événement peut être attribuée au forçage anthropique. Le deuxième est le rapport de probabilité (également appelé rapport de risque), PR = p1/p0, qui décrit combien de fois l'événement est susceptible d'être dû aux effets du forçage anthropique.

L'attribution peut également être abordée à travers la notion d'émergence du signal anthropique, c'est-à-dire le moment à partir duquel l'évolution des conditions météorologiques favorables aux incendies dépasse la variabilité climatique naturelle. À l'échelle globale, Abatzoglou et al. (2019) estiment qu'environ 22 % des surfaces continentales inflammables présentaient déjà en 2019 une influence détectable du changement climatique anthropique sur les conditions de danger incendie, proportion qui pourrait atteindre 33 à 62 % d'ici 2050. L'émergence est particulièrement précoce dans certaines régions méditerranéennes (Fig. 9) (Abatzoglou et al. 2019; Boer et al. 2017) mais aussi en France (Fargeon et al. 2020).

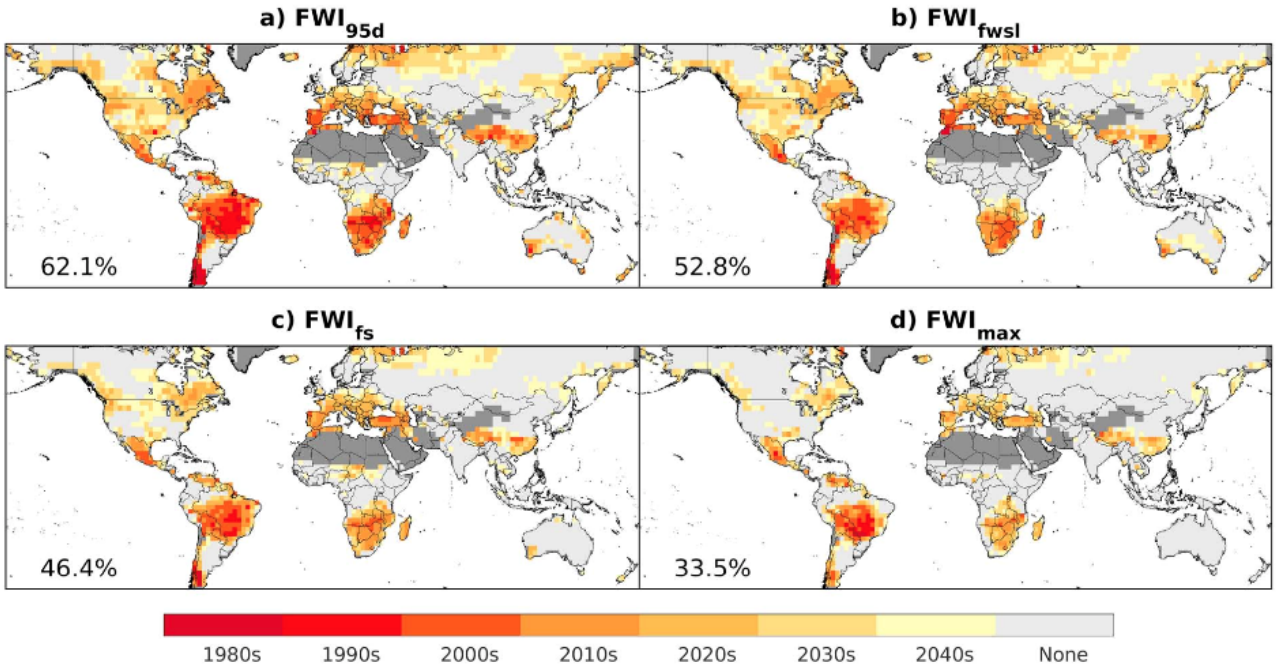


Figure 9 : Cartographie de l'année d'émergence du forçage anthropique (directement lié au changement climatique anthropique) vis-à-vis de la variabilité naturelle du climat. Cette métrique permet de caractériser l'influence du changement climatique sur les conditions météorologiques à l'échelle régionale. Elle se décompose en (a) la fréquence de jours excédant le 95e percentile de l'indice de danger incendie (FWI pour *fire weather index*), (b) la durée de la saison des feux (FWSL pour *fire weather season length*), (c) la valeur maximale moyenne sur 90 jours de l'indice de danger incendie, et (d) la valeur maximale annuelle de l'indice de danger incendie. Le % dans chaque quadrant correspond au % de surfaces inflammables qui voient l'émergence du forçage anthropique d'ici 2050. La France, et en particulier la région méditerranéenne, est particulièrement touchée (Abatzoglou et al. 2019).

Feng et al. (2025) ont effectué une étude d'attribution des causes anthropiques pour les événements extrêmes des feux au niveau mondial. Ils considèrent que FWI (issue des conditions météo) représente le danger des feux. Le FWI est associé aux surfaces brûlées (BA) au-delà du 85e percentile. En utilisant une valeur de seuil correspondant à un percentile élevé (85) de FWI, seuls les événements extrêmes sont considérés. Les auteurs ont évalué la probabilité des événements incendiaires extrêmes dans le monde factuel (simulations actuelles CMIP6) et celle dans le monde contrefactuel (simulations préindustrielles CMIP6) pour déduire la FAR (fraction du risque attribuable). Dans cette étude de Feng et al. (2025), les auteurs utilisaient un modèle de régression logistique pour estimer la probabilité d'un incendie extrême en fonction de l'indice FWI. Le modèle est calibré avec les données GFED pour les surfaces brûlées, et les données réanalysées ERA5 pour l'indice FWI, avant d'être appliqué aux simulations climatiques. Les résultats montrent que la FAR est de 0,08 en moyenne. C'est-à-dire que le changement climatique anthropique (par rapport au préindustriel) est responsable d'une fraction égale à 8 % de la probabilité de subir un incendie extrême, et ceci dans 15 des 19 régions analysées. Si la hausse des températures est le principal facteur à l'origine de l'augmentation de la probabilité d'incendies extrêmes, les changements dans les précipitations, l'humidité relative et la vitesse du vent modulent considérablement les changements liés aux incendies dans de nombreuses régions. Les auteurs ont aussi analysé la variation de FAR entre 2002 et 2015 et ils ont trouvé que la FAR a augmenté de 5,2 % par décennie à l'échelle globale, ce qui correspond à une accélération de l'augmentation des incendies extrêmes due au climat au cours des dernières décennies.

L'été 2022 a été exceptionnellement chaud et sec en Europe et particulièrement dans le Sud-Ouest de la France avec des incendies sans précédent depuis 1949. Dans quelle mesure sont-ils imputables au changement climatique anthropique ? Lanet et al. (2024) ont effectué une étude d'attribution du changement climatique axée sur les impacts. Ils ont d'abord étudié un ensemble d'indices climatiques afin de trouver celui qui est le plus corrélé à la surface brûlée de la forêt des Landes de Gascogne. En effet, l'indice combinant l'humidité du sol intégrée sur 6 mois, la température de surface intégrée sur 3 mois et le déficit de pression de vapeur intégré sur 3 mois

est le mieux corrélé aux incendies. Il peut ensuite être utilisé pour estimer l'ampleur des incendies de l'été 2022 attribuable au changement climatique anthropique. Les résultats montrent que les conditions climatiques propices au développement des incendies de l'été 2022 ont une période de retour de 13 ans dans le climat actuel. Cette période de retour serait de 30 ans sans changement climatique anthropique. La part du risque attribuable au changement climatique anthropique en cours est estimée à 50 %. Cette étude pose la question de la durabilité de la forêt landaise et souligne l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de s'adapter au changement climatique. Il est à noter que Barbero et al. (2020) a effectué une étude d'attribution aux changements anthropiques du climat pour la saison de feux exceptionnelle de 2003 en France.

À part le consortium européen spécialisé dans l'attribution des événements au changement anthropique, d'autres chercheurs internationaux sont aussi très actifs dans ce domaine de recherche. Kirchmeier-Young et al. (2019) rapportent une étude d'attribution pour la remarquable saison de feux 2017 au Canada. Celle-ci (Colombie-Britannique) a commencé lentement, avec un printemps humide et un nombre d'incendies inférieur à la normale jusqu'en juin. Cependant, les conditions chaudes et sèches de juillet et août ont entraîné une forte augmentation de l'activité des incendies, en particulier dans le sud. La superficie brûlée record est d'un ordre de grandeur supérieur au précédent record dans la cordillère sud de la Colombie-Britannique. Une analyse d'attribution des événements est effectuée. Elle compare la probabilité d'occurrence d'un événement entre un scénario incluant des facteurs anthropiques et un scénario sans influence anthropique. Comme l'ensemble CanRCM4 inclut les forçages naturels et anthropiques, la décennie 2011-2020 peut être utilisée pour représenter le climat actuel et une décennie antérieure, 1961-1970, pour représenter un climat alternatif avec une influence réduite des émissions humaines. Une grande partie du réchauffement climatique mondial s'est produite depuis les années 1970, et la différence entre les températures de ces deux décennies est similaire à la différence entre les simulations à forçage total et celles à forçage naturel uniquement. Les résultats montrent que les facteurs de risque ayant influé sur l'événement et la superficie brûlée ont été considérablement aggravés par le changement climatique anthropique. Plus de 95 % de la probabilité des anomalies de température maximale observées est due à des facteurs anthropiques. Les paramètres météorologiques et comportementaux élevés de l'événement ont été rendus 2 à 4 fois plus probables et le changement climatique anthropique a multiplié par 7 à 11 la superficie brûlée. Cette influence profonde du changement climatique sur les incendies extrêmes en Colombie-Britannique, qui se reflète probablement dans d'autres régions et devrait s'intensifier à l'avenir, nécessitera une attention accrue en matière de gestion forestière, de santé publique et d'infrastructures.

Kirchmeier-Young et al. (2024) considère les incendies 2023 au Canada comme un événement extrême, et essaye de faire son attribution au changement climatique anthropique. Cet épisode est caractérisé par une superficie de feux exceptionnelle. L'étude utilise des modèles statistiques pour établir un lien entre la superficie brûlée de forêt et les indices du système FWI qui constitue le lien le plus direct entre les conditions météorologiques et les incendies. Les indices du système FWI se sont révélés être de bons prédicteurs de la propagation des incendies et des zones brûlées. Dans cette étude, des modèles de régression ont été développés pour prédire les zones brûlées sur la base des mesures annuelles des indices du système FWI à partir d'observations, et ils sont ensuite utilisés pour estimer les zones brûlées dans des climats simulés avec et sans influence humaine. Les analyses se font au niveau des écozones du territoire canadien pour prendre en compte la diversité des relations entre les conditions météorologiques et les incendies. Les distributions des zones brûlées obtenues par régression sont comparées entre les simulations climatiques avec influence humaine et celles d'un climat contrefactuel avec peu ou pas d'influence humaine. Un rapport de risque est calculé comme le rapport entre la probabilité d'une superficie brûlée au moins aussi grande qu'en 2023 dans le climat actuel, et la probabilité d'une telle superficie brûlée dans un climat contrefactuel. Les résultats montrent que les changements climatiques d'origine anthropique ont considérablement augmenté la probabilité que la superficie brûlée soit au moins aussi importante qu'en 2023 dans la majeure partie du Canada, avec une augmentation de plus du double dans l'est et le sud-ouest. La longue saison des incendies était plus de cinq fois plus probable et les vastes régions du Canada connaissant des conditions météorologiques extrêmes synchronisées propices aux incendies étaient également beaucoup plus susceptibles d'être touchées en raison de l'influence humaine sur le climat.

L'étude de Jain et al. (2024) fournit une très bonne description événementielle. Il décrit les différents aspects de cette saison de feu exceptionnelle au Canada en 2023. Elle a été sans précédent par son ampleur et son intensité, s'étendant de la mi-avril à la fin octobre et touchant une grande partie des régions forestières du pays. La superficie totale brûlée, qui a atteint un niveau record (~15 M ha), peut être attribuée à plusieurs facteurs environnementaux qui ont convergé au début de la saison : fonte précoce des neiges, conditions de sécheresse pluriannuelles dans l'ouest du Canada et transition rapide vers la sécheresse dans l'est du Canada. Le changement climatique anthropique a permis le maintien de conditions météorologiques extrêmes propices aux incendies, la température moyenne de mai à octobre au Canada en 2023 ayant été supérieure de 2,2 °C à la moyenne de 1991-2020. Les conséquences ont été profondes : plus de 200 communautés ont été évacuées, des millions de personnes ont été exposées à une qualité de l'air dangereuse en raison de la fumée et les ressources consacrées à la lutte contre les incendies ont été sollicitées comme jamais auparavant. La saison des feux de forêt de 2023 au Canada a non seulement établi de nouveaux records, mais elle a également mis en évidence les défis croissants posés par les incendies dans le pays.

3.3.2. Analyse et compréhension des processus

Outre le cadre statistique formel de l'attribution probabiliste des événements extrêmes, de nombreuses autres études évaluent aussi le rôle du changement climatique. On montre ici quelques exemples.

Abatzoglou et Williams (2016) ont utilisé les simulations climatiques historiques du CMIP5 pour estimer la contribution du changement climatique anthropique à l'augmentation observée de huit indicateurs d'aridité des combustibles dans l'ouest des États-Unis. L'impact sur la superficie des incendies est ensuite obtenu par une régression avec le changement d'aridité des combustibles. Les augmentations anthropiques de la température et du déficit de pression de vapeur ont considérablement accru l'aridité des combustibles au cours des dernières décennies et ont contribué à une augmentation moyenne de neuf jours par an du risque d'incendie. Le changement climatique anthropique a représenté environ 55 % des augmentations observées de l'aridité des combustibles entre 1979 et 2015 dans les forêts de l'ouest des États-Unis, soulignant à la fois le changement climatique anthropique et la variabilité climatique naturelle comme facteurs importants contribuant à l'augmentation du risque au cours des dernières décennies. Cela correspond à 4,2 millions d'hectares supplémentaires de superficie forestière brûlée entre 1984 et 2015, soit près du double de ce qui aurait été observé en l'absence de changement climatique anthropique.

Anthony L. Westerling et al. (2006) avaient étudié 34 ans d'histoire des incendies dans l'ouest des États-Unis (depuis 1970) ainsi que les données hydroclimatiques afin de déterminer où les augmentations les plus importantes ont eu lieu et d'évaluer dans quelle mesure les tendances climatiques ont pu être des facteurs déterminants. Il a été montré que l'activité des grands incendies a augmenté de manière soudaine et marquée au milieu des années 1980, avec une fréquence plus élevée des grands incendies, leur durée plus longue et des saisons des incendies plus longues. Les augmentations les plus importantes se sont produites dans les forêts des Rocheuses septentrionales, à moyenne altitude, où l'histoire de l'utilisation des terres a relativement peu d'effet sur les risques et où elles sont fortement associées à l'augmentation des températures au printemps et en été et à une fonte des neiges plus précoce au printemps.

La détection et l'attribution de l'activité incendiaire mondiale au changement climatique anthropique sont brouillées par les influences d'autres activités anthropiques telles que le changement de couverture terrestre, la population et la suppression des incendies, ainsi que par les enregistrements satellitaires des incendies, qui sont limités dans le temps. Les efforts conjoints d'attribution pour les systèmes naturels, tels que les incendies, sont plus difficiles que l'attribution des variables météorologiques et climatiques au changement climatique anthropique. Une approche alternative qui complète les méthodes d'attribution traditionnelles est le cadre du temps d'émergence (ToE) du changement climatique anthropique. Le ToE est défini lorsqu'un signal forcé par le changement climatique anthropique dépasse une certaine mesure de la variabilité climatique interne qui se produit en l'absence de forçage anthropique. Abatzoglou et al. (2019) utilise le cadre du ToE pour déterminer quand et où le signal du changement climatique anthropique émerge de la variabilité climatique interne à travers le prisme de l'indice météorologique des incendies (FWI).

Les changements dans l'activité incendiaire mondiale sont influencés par une multitude de facteurs, notamment les changements dans la couverture terrestre, les politiques et les conditions climatiques. Abatzoglou et al. (2019) ont utilisé 17 modèles climatiques pour évaluer à quel moment les changements dans les conditions météorologiques propices aux incendies, tels que mesurés par l'indice Fire Weather Index, sortent de la fourchette prévue de variabilité interne en utilisant le cadre ToE. Pour l'année en cours 2019, le ToE est atteint sur 22 % des terres combustibles à l'échelle mondiale, notamment dans une grande partie de la Méditerranée et de l'Amazonie. L'émergence de conditions météorologiques propices aux incendies de plus en plus fréquents s'étend à mesure que la température mondiale augmente. À 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels, la zone d'émergence est deux fois moins importante qu'à 3 °C.

3.3.3. Complexité dans l'attribution de causes

Tous les incendies médiatiques ou de forts impacts sociétaux ne sont pas attribuables au changement climatique anthropique.

Plusieurs chercheurs dans la communauté de recherche internationale sont très expérimentés et actifs dans l'attribution des événements climatiques extrêmes au changement anthropique. Ils sont capables de faire une publication très peu de temps après l'événement, impact médiatique garanti. Ils ont une plateforme prête à l'emploi et très rapidement. Wanders et al. (2020) est une étude du genre avec une application sur les incendies de très grande ampleur qui ont eu lieu en Australie pour la saison estivale 2019/2020. L'étude révèle la complexité de ces incendies, seulement certains facteurs conduisant aux incendies — mais pas tous — portent la marque du changement climatique d'origine anthropique.

En 2018, la Suède a connu d'importants incendies, suite à des conditions climatiques chaudes et sèches. Krikken et al. (2021) utilisent l'indicateur FWI pour étudier cet épisode de forts impacts sociétaux. Ils ont d'abord montré que la période de retour est estimée à 24 ans, avec une forte diversité parmi les différents jeux de données reanalysés. Mais ils n'ont pas réussi à attribuer l'épisode au changement climatique. Leur analyse en GEV (*generalised extreme value*) ne donne pas de résultats statistiquement significatifs, par rapport au cas du préindustriel. En revanche, pour un climat de 2 degrés de réchauffement, la probabilité d'occurrence est 2 fois supérieure à celle du climat actuel.

3.4. Modélisation des feux, approche dynamique versus statistique

Pour prédire avec précision les effets du changement climatique sur les incendies de végétation, il faut comprendre les mécanismes reliant le climat et le comportement du feu, ce qui implique de relier des processus à travers des ordres de grandeur d'échelles spatiales et temporelles. Les processus climatiques dynamiques opèrent à des échelles relativement grandes, mais les processus liés au comportement du feu opèrent à des échelles relativement petites (par exemple, moléculaires et microsecondes). Le climat et les feux forment des processus couplés. Malheureusement, notre compréhension actuelle de ces couplages est limitée, ce qui entrave notre capacité à prédire les effets du changement climatique sur les incendies. Il n'est actuellement pas possible de faire des prévisions précises des effets du changement climatique sur les incendies en raison de la compréhension limitée du lien entre les résultats des modèles de circulation générale et la météorologie à l'échelle locale à laquelle réagissent les processus de comportement du feu. Les modèles basés sur les processus ont le potentiel de conduire à de meilleures prévisions que les modèles strictement empiriques qui peuvent, parfois, être basés sur des corrélations fallacieuses entre des variables choisies arbitrairement.

Il est probable que les impacts économiques et environnementaux des feux de végétation s'aggraveront en raison du changement climatique anthropique. Ces effets seront particulièrement marqués dans les forêts inflammables des zones tempérées peuplées, dans la zone boréale inflammable peu peuplée et dans les forêts tropicales humides sensibles au feu, et contribueront aux émissions de gaz à effet de serre. Les impacts de l'augmentation de l'activité incendiaire peuvent être atténués grâce à une gestion efficace des régimes incendiaires, qui devrait être mise en œuvre par le biais d'une gestion des incendies fondée sur des données

probantes, intégrant les connaissances autochtones et locales, combinée à la planification et à la conception de paysages naturels et urbains. Il est nécessaire d'intensifier la recherche transdisciplinaire afin de comprendre pleinement comment les régimes incendiaires de l'Anthropocène évoluent et comment les humains doivent s'adapter.

3.4.1. Modéliser le feu, ses comportements et ses liens avec le climat

Macias-Fauria et al. (2011) ont passé en revue différents processus permettant de comprendre les effets du changement climatique sur les incendies de végétation. À ce sujet, on se réfère aussi à l'article de revue de Williams et Abatzoglou (2016). Ils ont présenté certaines des connaissances actuelles sur les processus par lesquels le climat contrôle le comportement des feux en se concentrant sur quatre étapes critiques du développement d'un incendie : (1) le séchage du combustible, (2) l'inflammation, (3) la propagation et (4) l'extinction.

Dans les combustibles forestiers, l'eau est un puits de chaleur qui influe sur plusieurs aspects de la combustion, notamment le préchauffage, la pyrolyse, la vitesse de propagation, le taux de libération d'énergie et le temps d'extinction. L'allumage est la séquence de processus reliant le chauffage initial d'un combustible par une source externe de rayonnement ou de convection à des processus de combustion auto-entretenus dans le combustible, où la chaleur produite par les réactions de combustion exothermiques est suffisante pour entraîner des processus de pyrolyse endothermiques. La propagation d'un incendie peut être considérée comme une série d'allumages pilotés d'éléments combustibles fins adjacents au front de feu enflammé. La chaleur est libérée par la combustion et transportée vers les éléments combustibles non brûlés, qui sont préchauffés pour vaporiser l'eau résiduelle et déclencher la pyrolyse. Une fois que la pyrolyse produit des composés volatils à un rythme suffisant pour entretenir l'oxydation, la combustion commence et le front de feu s'est effectivement propagé. Cette séquence de processus détermine la vitesse de propagation et, en fin de compte, la superficie brûlée. L'extinction du feu est encore une fois un effet des processus de bilan thermique qui équilibrent les termes de source de chaleur et de puits de chaleur. L'extinction a traditionnellement été considérée en termes de teneur en eau du combustible à laquelle le feu cesse de se propager.

Le comportement des feux est régi par des processus à petite échelle qui réagissent aux conditions météorologiques locales, notamment l'évaporation, la convection, le rayonnement et l'advection ; tous ces processus sont le résultat de bilans hydrologiques et énergétiques couplés, qui réagissent à leur tour aux interactions couplées à grande échelle entre l'océan et l'atmosphère. Par conséquent, pour prédire les effets du changement climatique sur les incendies, il faut unifier les processus climatiques et les processus liés au comportement des feux à toutes les échelles. Malheureusement, cette entreprise dépasse nos capacités actuelles, et il existe de nombreuses lacunes entre notre compréhension des modèles et des processus climatiques et les variations météorologiques à petite échelle pertinentes pour le comportement des incendies.

Depuis longtemps, les modélisateurs du climat ont commencé à inclure un module des incendies dans la modélisation du climat dont l'objectif ultime est de construire un système terre avec toutes les composantes incluses. Malgré des efforts, nous sommes encore dans une phase très préliminaire dans la modélisation du feu.

Pechony et Shindell (2010) avaient déjà rapporté un effort qui a intégré un module représentant des incendies dans le modèle de climat global GISS. Ce module de feux estime l'activité des incendies en fonction de la densité de la végétation, des conditions météorologiques ambiantes (température, humidité relative et précipitations), de la disponibilité des sources d'inflammation (foudre et anthropiques) et des taux d'extinction des incendies. Ils l'ont ensuite utilisé pour tenter de reproduire les tendances de l'activité des incendies au cours du dernier millénaire et de séparer les effets climatiques et anthropiques. Les variations climatiques et les changements d'utilisation des sols simulés sont utilisés pour estimer les tendances de base de l'activité des incendies, en supposant une distribution omniprésente des sources d'inflammation, sans aucune interférence humaine directe. Les densités de population sont utilisées pour évaluer les effets anthropiques directs (inflammation et extinction des incendies, qui augmentent toutes deux avec la densité de population), en supposant que l'efficacité de la lutte contre les incendies augmente avec le temps.

Le modèle reproduit avec succès les données mondiales relatives aux incendies au cours du dernier millénaire et révèle des régimes distincts dans le comportement global des incendies. On peut constater que pendant la période préindustrielle, le régime global des incendies était fortement influencé par les précipitations (plutôt que par la température), avant de passer à un régime anthropique avec la révolution industrielle. Au-delà du climat historique et les activités associées du feu, les auteurs ont aussi fait la projection future des régimes d'incendie, et ils ont observé un passage imminent à un régime global des incendies déterminé par la température au XXIe siècle, créant un environnement sans précédent propice aux incendies. Ces résultats suggèrent la possibilité qu'à l'avenir, le climat joue un rôle considérablement plus important dans l'évolution mondiale des incendies, surpassant l'influence anthropique directe sur les incendies (tant leur déclenchement que leur extinction), ce qui constituerait un renversement de la situation observée au cours des deux derniers siècles.

Les principaux facteurs favorisant les incendies dans le contexte du changement climatique global se résument en termes suivants : (1) changements dans l'activité de la foudre ; (2) changements dans la météorologie des incendies, notamment la température, les précipitations et l'humidité ; (3) changements dans la couverture terrestre liés au climat ; (4) changements anthropiques dans l'utilisation des sols ; et (5) changements dans la densité de population. Yaoxian Huang et al. (2015) ont étudié les impacts de tous ces facteurs sur les incendies à l'échelle globale. Ils ont séparé ces effets à l'aide d'une série de simulations de sensibilité des modèles. Le système de modélisation intégré utilisé dans cette étude permet de comparer l'importance relative de divers facteurs ainsi que leurs patterns spatio-temporels dans le contexte du changement climatique global. Par rapport aux conditions de 2000, la fréquence mondiale des incendies dans les années 2050 devrait augmenter d'environ 27 % si l'on tient compte de l'ensemble des facteurs déterminants. Les changements climatiques dans l'activité de la foudre et la météorologie des incendies (y compris la température, les précipitations et l'humidité) au cours de la période 2000-2050 augmentent la fréquence mondiale des incendies d'environ 4 % et 19 % respectivement. Les changements démographiques mondiaux entre 2000 et 2050 devraient réduire le nombre total d'incendies dans le monde d'environ 7 %. Sous l'effet du changement climatique et de la fertilisation croissante par le CO2, les changements dans la couverture terrestre d'ici 2050 devraient entraîner une augmentation des incendies dans le monde d'environ 15 % par rapport aux niveaux de 2000. En revanche, il apparaît que les changements dans l'utilisation des sols entre 2000 et 2050 auront peu d'effet sur le nombre total de feux dans le monde, mais perturberont fortement certaines régions. Une augmentation significative du nombre de feux est simulée dans la région amazonienne, en Australie et en Russie centrale, principalement en raison des changements dans l'activité de la foudre, la météorologie des feux et la couverture terrestre, tandis qu'une forte tendance à la baisse est prévue en Afrique du Sud-Est en raison des changements dans l'utilisation des sols et la population.

Notre rapport ne traite que les incendies de végétation et leurs liens avec l'interface entre zones urbaines et zones naturelles (WUI). Cette interface correspond à la zone où les constructions et la végétation sauvage se rencontrent ou s'entremêlent. Il est à noter que d'autres types d'incendies peuvent également surgir en zone urbaine, comme dans Shi et al. (2025) : incendies de bâtiments, incendies extérieurs et incendies de véhicules (batterie). Basés sur les données collectées dans plus de 2800 agglomérations du monde, les résultats montrent que la fréquence des incendies de bâtiments augmente de manière quadratique et que le minimum se produit à la température de confort thermique (c'est-à-dire autour de 24,0 °C) ; tandis que pour chaque augmentation de 1 °C de la température de l'air, la fréquence des incendies de véhicules et des incendies extérieurs augmente de 2,7 % et 4,7 %. Dans le scénario SSP5-8.5 d'ici 2100, il est projeté que la fréquence des incendies de bâtiments pourrait diminuer de 4,6 %, tandis que celle des incendies de véhicules et des incendies extérieurs pourrait augmenter de 11,6 % et 22,2 %.

L'interface entre zones naturelles et zones industrielles (WII) est un autre milieu où les incendies peuvent éclater et déclencher des accidents ou des événements en cascade conduisant à des situations extrêmement dangereuses pour la population et entraînant d'énormes pertes économiques. Planas et al. (2023) ont étudié l'interface WII. Ils montrent qu'en Europe, 2,5 % du territoire et 6 % des zones végétalisées relèvent de la WII. Des analyses du risque d'incendies dans la WII doivent être davantage conduites, dans ce type de zones.

3.4.2. Progrès de la modélisation dynamique

Le projet FireMIP (*Fire Model Intercomparison Project*) est une initiative internationale pour comparer les différents modèles de la communauté des modélisateurs des incendies. Il évalue des modèles globaux avec module du feu avec un protocole commun pour pouvoir les intercomparer. Les incendies ont une incidence sur un large éventail de processus au sein du système terrestre. Des modules spécifiques simulant les zones brûlées et les émissions liées aux incendies sont de plus en plus souvent intégrés dans les modèles dynamiques de végétation mondiale (DGVM) et les modèles du système terrestre (ESM). Ils sont très utiles pour évaluer les impacts des changements environnementaux sur les régimes d'incendie et le cycle du carbone, et pour déduire les relations entre le climat, l'utilisation des terres et les incendies. Cependant, la représentation des incendies implique de nombreuses hypothèses sur les processus liés à la végétation et aux incendies, tels que l'allumage, la propagation et l'extinction. Leur mise en œuvre technique dans les modèles numériques est également difficile. Le projet FireMIP coordonne l'évaluation des modèles mondiaux de pointe sur les incendies, afin d'améliorer les projections des caractéristiques des incendies et de leurs impacts sur les écosystèmes et les sociétés humaines dans le contexte du changement environnemental global.

Teckentrup et al. (2019) ont utilisé des simulations réalisées dans FireMIP avec sept modèles dynamiques globaux de végétation disponibles dans la communauté de modélisation climatique pour étudier comment les régimes d'incendie peuvent changer au fil du temps et comment leur évolution future peut avoir un impact sur le système terrestre, y compris la société. Les expériences de sensibilité isolent l'impact des facteurs individuels prescrits sur la superficie brûlée simulée. Plus précisément, ces facteurs sont la concentration atmosphérique de CO2, la densité de population, le changement d'affectation des terres, la foudre et le climat. Les sept modèles capturent les patterns spatiaux des zones brûlées. Cependant, ils montrent des différences considérables dans les tendances des zones brûlées depuis 1921. Les trajectoires des différences entre les simulations de sensibilité et de référence ont été analysées afin de comprendre ce qui détermine les tendances mondiales en matière de zones brûlées. Il apparaît que les plus grandes incertitudes dans la simulation des zones brûlées historiques à l'échelle mondiale sont liées à la représentation des incendies d'origine anthropique et de leur suppression, ainsi qu'aux effets de l'utilisation des sols sur la végétation et les incendies. Conformément aux études précédentes, cela souligne la nécessité d'améliorer notre compréhension et la représentation dans les modèles de la relation entre les activités humaines et les incendies afin d'améliorer nos capacités à modéliser ces derniers dans les applications des modèles du système terrestre. Les effets des changements de la concentration atmosphérique de CO2 sur les incendies sont complexes et il manque des informations quantitatives sur la façon dont les charges combustibles et l'inflammabilité changent en raison de ce facteur. La réponse à la foudre à l'échelle mondiale est faible. La réponse des zones brûlées au climat est spatialement hétérogène et présente une forte variation interannuelle. Le climat est donc probablement plus important que les autres facteurs pour les variations à court terme et les extrêmes dans les zones brûlées.

Hantson et al. (2020) ont procédé à une évaluation systématique des simulations historiques réalisées par neuf modèles FireMIP afin de quantifier leur capacité à reproduire une série de repères en matière d'incendies et de végétation. Les scores de référence indiquent que la plupart des modèles sont capables de représenter la répartition spatiale des zones brûlées. Les modèles reproduisent également assez bien la saisonnalité des zones brûlées, mais ont du mal à simuler la durée de la saison des incendies et sont largement incapables de représenter les variations interannuelles des zones brûlées. D'une manière générale, certains modèles sont plus performants pour représenter certains aspects du régime des incendies, mais aucun ne surpasse clairement tous les autres modèles pour l'ensemble des variables évaluées.

Forkel et al. (2019) ont développé une approche d'évaluation de modèles à l'aide de l'algorithme Random Forest (RF) afin d'identifier les relations émergentes entre le climat, la végétation, les variables prédictives socio-économiques et les incendies (zones brûlées). Ils ont appliqué cette approche aux séries chronologiques mensuelles pour la période 2005-2011 à partir d'observations satellitaires et des modèles DGVM du FireMIP. Les modèles ont été exécutés à l'aide d'un protocole commun et des données de forçage communes. Les relations dérivées des données satellitaires indiquent une forte sensibilité des incendies aux variables climatiques (par exemple, température maximale, nombre de jours humides), aux propriétés de la végétation (par exemple, type de

végétation, productivité végétale et surface foliaire de la saison précédente, litière ligneuse) et aux variables socio-économiques (par exemple, densité de population humaine). Les DGVMs reproduisent globalement les relations avec les variables climatiques et, pour certains modèles, avec la densité de population. Il est intéressant de noter que les réponses dérivées des données satellitaires montrent une forte augmentation de la superficie brûlée avec une augmentation de l'indice de surface foliaire et de la productivité végétale de la saison précédente dans la plupart des écosystèmes sujets aux incendies, ce qui a été largement sous-estimé par la plupart des DGVM. Ainsi, l'approche d'évaluation des modèles permet de diagnostiquer que les effets de la végétation sur les incendies constituent une lacune majeure en ce qui concerne la capacité des modèles dynamiques globaux de végétation basés sur les incendies à simuler avec précision le rôle des incendies dans le contexte du changement environnemental global.

3.4.3. Modélisation statistique, efficace mais utilité limitée pour prévoir le futur

En parallèle de la modélisation dynamique du climat-feu, la modélisation statistique des incendies est aussi amplement développée et utilisée dans la recherche. Syphard et al. (2018) a fait une très bonne introduction pour cette approche statistique et les démarches associées. Les structures d'incendie apparaissent dans l'espace et dans le temps en fonction des régimes d'incendie propres à chaque région, par exemple en fonction de la taille, de la fréquence, de la superficie brûlée et de la sévérité des incendies, qui découlent des caractéristiques climatiques, topographiques et végétales d'un paysage, ainsi que du moment et de la répartition des incendies causés par la foudre ou par les humains. Par conséquent, l'idée qui sous-tend la cartographie de la manifestation spatiale des régimes d'incendie futurs consiste à modéliser les relations et les mécanismes qui sous-tendent les principaux facteurs à l'origine de l'activité récente des incendies, en particulier le climat, afin de prédire l'activité future des incendies en fonction de l'évolution de ces facteurs. Les deux principales approches méthodologiques utilisées pour cartographier l'activité future des incendies comprennent les modèles statistiques corrélatifs et les modèles de simulation basés sur les processus, bien que des projections basées sur l'évolution des indices de danger d'incendie aient également été développées. L'approche statistique est similaire à la modélisation de la répartition des espèces en ce sens que les fonctions de réponse sont estimées sur la base d'observations de la survenue ou de la fréquence des incendies par rapport à leurs facteurs climatiques ou autres facteurs environnementaux humains ou biophysiques hypothétiques. Les modèles ajustés en fonction de points reflétant les conditions récentes sont ensuite utilisés pour cartographier la probabilité d'incendie à des endroits non cartographiés dans l'espace et dans le temps ; les modèles d'incendie futurs sont cartographiés en remplaçant les variables climatiques actuelles utilisées pour ajuster le modèle par des cartes climatiques futures projetées. Les avantages de cette approche statistique descendante sont que ces modèles sont relativement simples à paramétrer et fournissent des résultats cartographiques intuitifs ; ils permettent d'évaluer l'importance des variables, contribuant ainsi à la compréhension théorique des relations entre les incendies et le climat ; et ils permettent de comparer efficacement différents scénarios climatiques ou de gestion. Les principaux inconvénients sont l'hypothèse de relations stationnaires dans le temps et l'incapacité à tenir compte des rétroactions dynamiques entre les incendies, le climat, la végétation et l'activité humaine. En particulier, la pratique courante consistant à omettre la dynamique de la végétation pourrait introduire une source majeure d'incertitude dans les projections du modèle, car l'humidité, l'abondance et la structure du combustible sont des facteurs clés qui contrôlent l'activité des incendies. Le changement climatique devrait entraîner de manière indépendante des changements spectaculaires, mais incertains, dans la répartition des espèces végétales en raison de contraintes physiologiques. Les incendies ont également une forte rétroaction sur les modèles climatiques et végétaux.

Syphard et al. (2018) ont évalué la sensibilité des projections futures des incendies à différentes combinaisons de cartes de végétation utilisées comme variables explicatives dans un cadre de modélisation statistique des incendies. Ils ont comparé des modèles sans végétation à des modèles intégrant des cartes de végétation statiques et incluant les résultats d'un modèle de végétation dynamique qui imposait trois scénarios d'incendie et un scénario de changement d'utilisation des sols. Ils ont cartographié la probabilité future prévue de tous les incendies et des grands incendies (> = 40 ha) dans deux scénarios climatiques dans une zone d'étude hétérogène couvrant un large gradient altitudinal dans la Sierra Nevada, en Californie, aux États-Unis. Les résultats ont

montré une forte sensibilité des modèles au traitement de la végétation en tant que variable prédictive, en particulier pour les modèles de probabilité d'incendies de grande ampleur et pour les modèles tenant compte des effets des incendies sur la végétation, qui ont réduit la probabilité d'incendies futurs. Certains scénarios ont donné lieu à des tendances opposées en termes d'étendue et de probabilité des incendies futurs, ce qui pourrait avoir de graves implications pour l'allocation des ressources en matière de politique et de gestion. La sensibilité des modèles résultait de l'importance relative élevée des variables de végétation dans les modèles de référence et des changements importants prévus dans la végétation, en particulier lors de la simulation d'incendies.

L'étude menée par Zhi Hua Liu et Michael C. Wimberly (2016) est basée sur une modélisation statistique. Ils avaient développé un modèle empirique qui, après calibration, simule les effets du changement climatique et de la végétation sur la fréquence, la taille et la propagation des incendies. L'ouest des États-Unis a été choisi comme zone d'étude. L'hypothèse générale est que les effets indirects du changement climatique sur la répartition des principaux types de végétation auront une importance sur les patterns régionaux des régimes d'incendie futurs. Leur démarche consiste à d'abord utiliser des modèles de niche écologique pour établir les relations corrélatives actuelles entre le climat présent et la répartition de la végétation, et puis projeter les changements de la répartition de la végétation induits par le climat sur la base des conditions climatiques futures prévues. Ils ont finalement mené des simulations afin d'étudier les réponses des régimes d'incendies au changement climatique et aux changements de végétation liés au climat, tout en maintenant constants les autres déterminants biophysiques et humains. Les résultats ont montré que les projections des superficies brûlées futures étaient effectivement sensibles aux effets indirects des changements de la végétation induits par le climat, qui augmentaient considérablement la superficie brûlée future par rapport aux projections basées uniquement sur les effets directs du changement climatique.

Senande-Rivera et al. (2022) ont démontré qu'à l'aide d'indicateurs climatiques simples, il est possible de reproduire et expliquer la configuration actuelle des régions sujettes aux incendies à l'échelle globale et d'utiliser ensuite les tendances de ces indicateurs (à partir des projections climatiques de CMIP5) pour déduire les changements potentiels futurs dans l'étendue de l'activité incendiaire. Cette étude utilise la relation entre le climat et les incendies, sans tenir compte de la variabilité interannuelle, des éléments d'inflammation et des facteurs humains (lorsqu'ils ne sont pas liés au climat, par exemple certaines pratiques agricoles). La particularité est qu'elle établit les seuils du climat favorables aux feux à l'intérieur de chaque catégorie des zones climatiques de Koppen. La classification des zones de Koppen ou des sous-zones incendiaires est basée sur la climatologie (cycle saisonnier de température et de précipitation), donc facile à faire. La projection future peut se contenter d'ajouter une différence climatologique simulée par des modèles du climat. L'hypothèse sous-jacente est que, à grande échelle spatiale et décennale, il existe une forte probabilité d'observation d'incendies partout où les conditions climatiques sont favorables. Il reste donc à analyser uniquement les changements prévus dans les variables spécifiques de la classification climatologique des incendies. Les résultats montrent qu'en raison du réchauffement climatique, la superficie mondiale soumise à des conditions propices aux incendies fréquents augmenterait de 29 %, principalement dans les zones boréales (+111 %) et tempérées (+25 %), où la saison des incendies pourrait également s'allonger de manière significative.

Dong et al. (2022) rapportent une étude pour projeter vers le futur des activités incendiaires en Californie (CSCA, zone côtière du sud de la Californie). L'approche est classique et elle établit d'abord une relation statistique (avec l'algorithme Random Forest) entre les variables pertinentes du climat et la probabilité des incendies (grands feux dépassant les 40 hectares), et ensuite utilise cette relation pour la projection future des feux à l'aide des projections du climat pour le milieu et la fin du XXIe siècle (CMIP5). Les prédicteurs potentiels de la probabilité quotidienne d'incendie de grande ampleur (LFP) comprennent les variables météorologiques suivantes : déficit de pression de vapeur (VPD), la vitesse du vent (WS) et les précipitations, ainsi que les indices de danger d'incendie du National Fire Danger Rating System (NFDRS). Les résultats montrent que le nombre de jours de grands incendies passera de 36 jours/an entre 1970 et 1999 à 58 jours/an dans le scénario d'émissions modérées de gaz à effet de serre (RCP4.5) et à 71 jours/an entre 2070 et 2099 dans le scénario d'émissions élevées (RCP8.5). La saison des grands incendies sera plus intense, débutera plus tôt et se terminera plus tard. Les conclusions suggèrent que, malgré l'absence de tendance contemporaine dans le régime des incendies, les émissions de

gaz à effet de serre prévues augmenteront considérablement le risque d'incendie dans le sud de la Californie d'ici 2099.

Syphard et al. (2019) utilise le modèle MaxEnt pour chercher des relations entre les incendies, le climat et l'utilisation du sol en Californie. Le modèle est très performant pour estimer l'importance des variables et projeter les probabilités d'incendies actuels et futurs (en utilisant les sorties des modèles climatiques globaux). MaxEnt est une méthode statistique d'apprentissage automatique. Il estime la meilleure approximation d'une distribution par des comparaisons itératives entre les valeurs des variables prédictives environnementales à l'emplacement des lieux de présence (c'est-à-dire tous les incendies, les grands incendies, les structures détruites) et les valeurs des mêmes variables à 10 000 points de référence situés de manière aléatoire. La meilleure distribution est identifiée comme celle qui présente l'entropie maximale, et le modèle produit une grille continue dans laquelle chaque cellule se voit attribuer une probabilité relative d'occurrence à partir d'une fonction exponentielle. Reconnu comme l'un des modèles de distribution des espèces les plus performants, MaxEnt a également été utilisé avec succès dans toute une série d'analyses et d'applications cartographiques relatives aux incendies de végétation.

Ce cadre de modélisation intégré permet de quantifier l'importance des variables et de cartographier la distribution des probabilités actuelles et futures d'incendies et de pertes structurelles dans trois zones d'étude en Californie. La probabilité future d'incendies de grande ampleur et de pertes structurelles est projetée dans deux scénarios climatiques différents (chaud et sec ou chaud et humide) et deux scénarios d'utilisation des sols différents (croissance rurale ou urbaine résidentielle). L'importance relative du climat et du schéma d'habitation variait selon les régions et en fonction de la taille des incendies ou du fait que le modèle concernait les incendies de grande ampleur ou les pertes structurelles. Les différences dans l'intensité de ces relations, ainsi que les différences dans la nature et l'ampleur des changements climatiques ou d'utilisation des sols prévus, ont déterminé l'ampleur des changements prévus pour les incendies de grande ampleur ou les pertes de structures à l'avenir. Malgré cette variabilité, le logement et les infrastructures humaines ont toujours été les principaux facteurs expliquant les départs d'incendie et la probabilité de pertes de structures, tandis que les variables climatiques, topographiques et liées aux combustibles ont été plus importantes pour expliquer les structures des incendies de grande ampleur. Pour toutes les zones étudiées, la plupart des pertes de structures se sont produites dans des zones à faible densité de logements (de 0,08 à 2,01 unités/ha), et l'expansion de l'utilisation des terres résidentielles rurales a augmenté la probabilité de pertes de structures à l'avenir. Quel que soit le scénario climatique futur, la probabilité de grands incendies ne devrait augmenter que dans le nord et l'intérieur de la Californie, tandis que le changement climatique n'aurait aucun impact prévu sur la probabilité d'incendies dans le sud.

Chen et al. (2021) utilisent aussi la méthode statistique MaxEnt pour étudier les facteurs (biophysiques et anthropiques) impactant la probabilité des feux, sur l'ensemble de la Sierra Nevada. Elle s'appuie sur un ensemble de données maillées relatives à la probabilité d'incendie entre 1984 et 2017, avec une résolution spatiale de 4 km, qui a servi de base pour sélectionner les points de présence d'incendie. À partir des données météorologiques, des variables anthropiques, de la végétation et de la topographie, la probabilité d'incendie est modélisée et prédite à l'aide de MaxEnt (entropie maximale). La VPD moyenne à long terme (variable biophysique) était le prédicteur le plus influent du pattern spatial de la probabilité d'incendie, avec une contribution relative de 32,1 % au modèle intégré. La réponse de la probabilité d'incendie à la VPD suivait une courbe en « cloche », augmentant rapidement à faible VPD (en particulier entre 4 et 8 hPa), puis diminuant à forte VPD. La densité de population (variable anthropique) était le deuxième facteur prédictif le plus important dans le modèle intégré, avec une contribution relative de 15,8 %. La probabilité d'incendie diminuait rapidement avec l'augmentation de la densité de population, ce qui indique que les zones moins densément peuplées présentaient un risque d'incendie plus élevé. La productivité primaire nette, qui est un indicateur de la disponibilité du combustible, était la deuxième variable biophysique la plus importante, avec une contribution relative de 12,4 %. Une productivité plus élevée entraînait généralement une probabilité d'incendie plus élevée. La température maximale moyenne à long terme était la troisième variable biophysique importante, contribuant à hauteur de 6,1 % au risque d'incendie.

Jaideep Joshi et Raman Sukumar (2021) utilisent un cadre d'apprentissage automatique (sur base de réseau neurone artificiel) pour comprendre des interactions entre les incendies, le climat, la végétation et les activités humaines. Ces interactions peuvent varier d'une région à une autre. Un modèle de réseau neuronal multicouche a été développé pour prédire directement la superficie brûlée à partir de facteurs socio-environnementaux. Le modèle offre une très bonne prévisibilité entre les zones brûlées prévues et observées. Compte tenu des conditions socio-anthropiques actuelles, l'Asie équatoriale, l'Afrique australe et l'Australie présentent une forte sensibilité de la superficie brûlée à la température, tandis que l'Afrique du Nord présente une forte sensibilité négative. Dans l'ensemble, les forêts et les zones arbustives présentent une sensibilité plus forte de la superficie brûlée à la température que les savanes, ce qui pourrait affaiblir leur statut de puits de carbone dans les scénarios futurs de changement climatique. Les résultats ouvrent de nouvelles possibilités pour améliorer la prévision des incendies en utilisant des architectures de modèles plus avancées, associées à la disponibilité croissante de données à des résolutions spatio-temporelles plus élevées.

La modélisation statistique est très performante pour modéliser la relation climat-feu, et ensuite prévoir le futur du feu en fonction du scenario climatique élaboré, tout en conservant la même relation climat-feu. Cette approche a des limites assez évidentes et on doit être prudent des résultats ainsi obtenus. McKenzie et Littell (2017) ont émis plusieurs précautions à l'encontre de l'utilisation de l'approche statistique pour envisager les scénarios futurs du feu. Par exemple, s'il n'y a plus de combustibles, le feu ne peut plus se maintenir même si les conditions climatiques sont très favorables aux incendies. En plus, la stationnarité de la relation climat-feu n'est pas toujours satisfaite.

3.4.4. Rôle rétroactif de la végétation pour les incendies

Les incendies se déclarent lorsque la biomasse végétale (combustible) est suffisante et continue, que le combustible est suffisamment sec pour brûler, que les conditions météorologiques favorisent la propagation du feu et qu'il existe une source d'inflammation. Les effets du changement climatique sur les conditions météorologiques propices aux incendies sont fréquemment examinés à l'aide d'indices qui établissent un lien entre les conditions météorologiques en surface et le risque d'incendie. Contrairement à l'utilisation directe des variables météorologiques pour les conditions météorologiques propices aux incendies, la prévision des changements dans la croissance de la biomasse ou la charge combustible nécessite une transformation importante des données des modèles climatiques. La tâche est compliquée par la nécessité d'inclure la réponse potentielle de la végétation non seulement au changement climatique, mais aussi à l'augmentation du dioxyde de carbone. Hamish Clarke et al. (2016) ont fourni une évaluation quantitative de l'impact des changements prévus du climat et du CO2 sur la charge combustible et les conditions météorologiques propices aux incendies en Australie. Les prévisions météorologiques sont dérivées d'un modèle climatique régional, qui est ensuite utilisé pour alimenter un modèle de surface terrestre à partir duquel la charge combustible est estimée, en intégrant les effets directs et indirects de l'augmentation du CO2 atmosphérique. Une telle évaluation fournit une estimation plus complète des changements futurs dans les aspects clés du risque d'incendie de végétation.

L'étude de Turco et al. (2018) est une étude empirique qui établit une relation statistique entre les incendies (surface brûlée : *burned area*, BA) et le climat (sécheresse : *standardised precipitation-evaporation index*, SPEI). Le secteur géographique est l'Europe méditerranéenne. La particularité de Turco et al. (2018) est qu'ils travaillent sur deux relations : l'une avec le coefficient de régression pris comme constant et l'autre avec le coefficient de régression variable avec le temps (donc avec la température qui s'élève progressivement). Le premier cas est qualifié modèle stationnaire et le deuxième modèle non-stationnaire. La non-stationnarité est interprétée comme une possible modification des relations climat-feux dans des conditions climatiques modifiées en raison d'altérations de la productivité. Il a été constaté qu'une telle non-stationnarité pouvait être bénéfique, en réduisant de moitié environ les signaux d'intensification (voir figure 10). Quoi qu'il en soit, il est prévu que la superficie brûlée augmente. Plus le niveau de réchauffement est élevé, plus l'augmentation de la zone brûlée est importante, allant de ~40 % à ~100 % dans tous les scénarios. Ces résultats indiquent que l'on obtiendrait des avantages significatifs si on limitait le réchauffement à un niveau bien inférieur à 2 °C. Il y a aussi une conclusion intéressante : au cours des dernières décennies, la tendance mesurée de BA en Europe méditerranéenne a

généralement été stable ou négative, tandis que les conditions de sécheresse ont augmenté. Ces tendances opposées suggèrent que les mesures de gestion ont jusqu'à présent contrebalancé la tendance climatique.

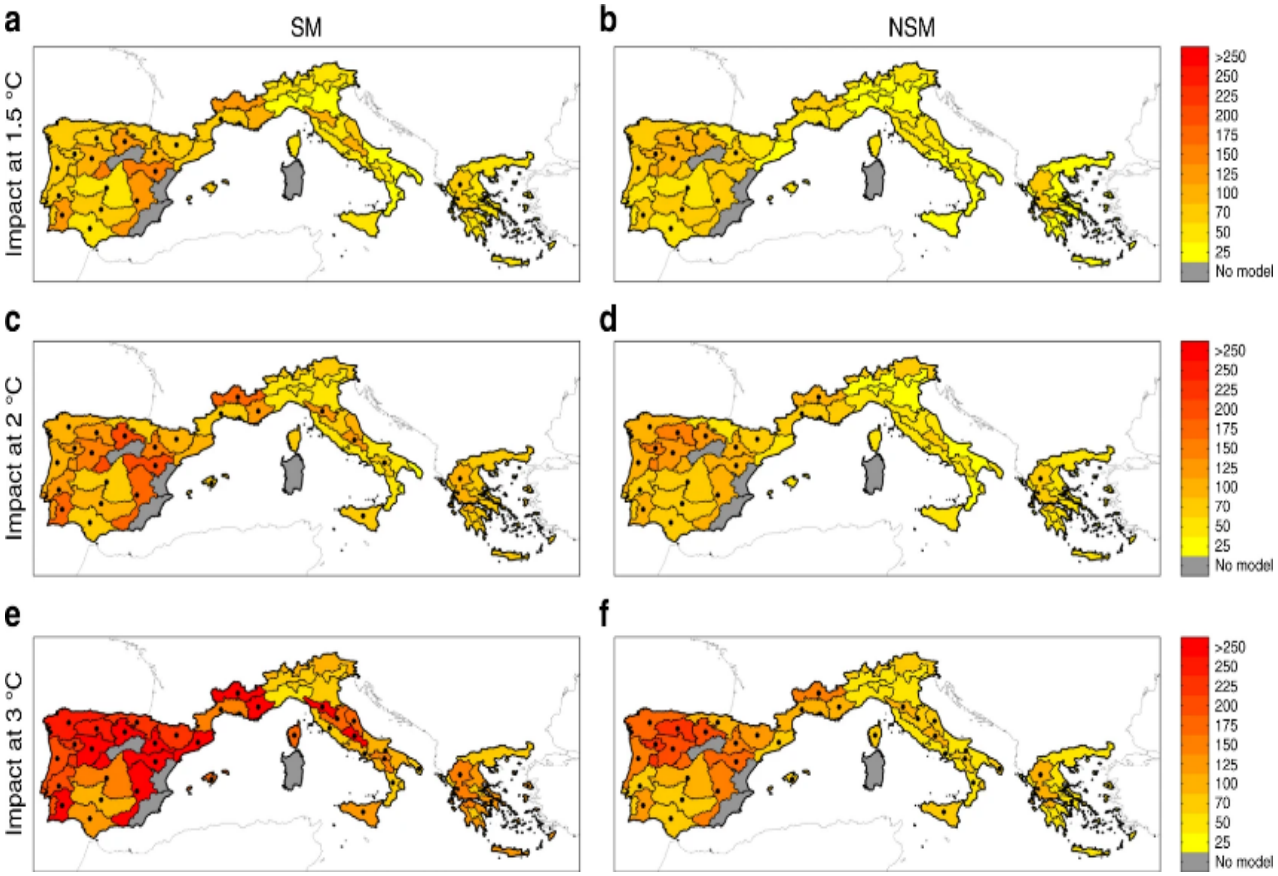


Figure 10 : Changements de la superficie brûlée (%) pour le réchauffement global à + 1,5 °C (en haut), + 2 °C (au milieu) et + 3 °C (en bas), calculés à l'aide d'un modèle empirique stationnaire (à gauche) ou non-stationnaire (à droite). Les couleurs correspondent aux changements par rapport au climat actuel. D'après Turco et al. (2018).

Le rôle du changement en végétation dans les incendies est aussi important que le changement climatique. Stuart Matthews et al. (2012) ont utilisé une série de modèles pour examiner les liens entre le climat, les combustibles et le comportement du feu dans les forêts sèches d'eucalyptus du sud-est de l'Australie. Les prévisions d'un modèle climatique régional ont été utilisées pour alimenter des modèles de quantité de combustible, de teneur en humidité des combustibles et deux modèles de comportement des feux de forêt à un endroit situé à l'ouest de Sydney, en Nouvelle-Galles du Sud, en Australie. Il a été démontré que la projection des changements dans le risque d'incendie nécessite la modélisation des changements dans la végétation ainsi que des changements climatiques. Une meilleure compréhension des effets du changement climatique sur la structure de la végétation est donc très importante pour mieux comprendre le devenir des incendies.

3.4.5. Les incendies entrent dans l'opérationnel

Le système global de prévision des incendies (*Global ECMWF Fire Forecast* : GEFF) est un système opérationnel mondial d'évaluation des risques d'incendie qui s'appuie exclusivement sur les forçages issus de la modélisation atmosphérique de l'ECMWF. Le GEFF est la composante de modélisation du Système européen d'information sur les incendies de forêt (*the European Forest Fire Information System* : EFFIS), qui est développé dans le cadre des services d'urgence Copernicus (*the Copernicus Emergency Services*) afin de fournir une plateforme d'informations partagées sur les risques d'incendie aux autorités de protection civile à travers l'Europe. Le GEFF calcule quotidiennement des prévisions à 10 jours pour les principaux indices des systèmes de notation : NFDRS (*the U.S. Forest Service National Fire-Danger Rating System*), FWI (*the Canadian Forest Service Fire Weather Index Rating System*), et Mark 5 (*the Australian McArthur rating systems*), en utilisant le système de prévision de l'ECMWF comme forçages atmosphériques.

Di Giuseppe et al. (2016) présentent les éléments de base du système de modélisation GEFF et évalue sa capacité maximale à identifier les conditions de danger d'incendie, avec la réanalyse ERA-Interim comme forçage atmosphérique. La base de données Global Fire Emissions Database (GFED4) fournit 11 ans de données sur les zones brûlées observées à partir de mesures satellitaires et est utilisée comme ensemble de données de validation. Les indices d'incendie mis en œuvre sont de bons prédicteurs pour mettre en évidence les conditions de danger. Les valeurs élevées sont corrélées avec les incendies observés, et les valeurs faibles correspondent à des événements non observés. Une évaluation plus quantitative des performances a été réalisée à l'aide de l'indice de dépendance extrême, qui est un score de performance spécialement conçu pour les événements rares. Elle a révélé que les trois indices étaient plus efficaces que les prévisions aléatoires pour détecter les grands incendies à l'échelle mondiale. Les performances sont maximales dans les forêts boréales, la région méditerranéenne, les forêts tropicales amazoniennes et l'Asie du Sud-Est. Les scores de performance ont ensuite été agrégés au niveau national afin de déterminer les pays qui pourraient potentiellement bénéficier des informations du système pour faciliter la prise de décision et la lutte contre les incendies. Dans l'ensemble, il a été constaté que la modélisation du danger d'incendie basée sur les prévisions météorologiques peut fournir une prévisibilité raisonnable sur de grandes parties de la surface continentale mondiale.

Torres-Vázquez et al. (2025) présentent une approche innovante pour prévoir les anomalies saisonnières des surfaces brûlées (BA) à l'aide d'une méthodologie hybride. Ils intègrent la prévision climatique saisonnière basée sur les processus dans un modèle climat-feu de type « Random Forest ». Ce modèle d'apprentissage automatique, lorsqu'il utilise uniquement les précipitations observées, est capable de prédire les anomalies des zones brûlées un mois avant le début de la saison des feux ciblée sur environ 68 % de la superficie susceptible de brûler. Lorsqu'il utilise des prévisions saisonnières, le système conserve des résultats pertinents sur environ 46 % de cette même superficie. Compte tenu de la disponibilité des données d'observation et de prévision en temps quasi réel, un prototype de prévision opérationnelle des zones brûlées peut s'avérer très utile pour améliorer les services climatiques.

3.5. Projections futures du danger et de l'activité incendiaire à partir des modèles climatiques

Au cours des 40 dernières années, on a pu observer une évolution de l'ampleur et de la persistance des incendies à l'échelle globale. Les feux se déclarent dans de nouvelles régions en raison de l'inflammabilité accrue de la végétation. Ils surviennent en dehors de la saison traditionnelle des incendies et sont beaucoup plus intenses. Un petit nombre de feux de forte intensité, souvent appelés méga-incendies, sont responsables de la plupart des zones brûlées recensées. Leurs effets secondaires comprennent l'érosion, la déforestation, l'épuisement des stocks de carbone, et ils constituent une menace pour la sécurité humaine et les infrastructures (voir Chap. 4, Conséquences). Ces événements revêtent également une importance particulière pour la gestion des incendies. Ceux qui se propagent rapidement sont difficiles à maîtriser et ont souvent des conséquences catastrophiques. Aucune méthode de lutte contre les incendies ne permet de faire face entièrement aux méga-incendies, qui sont souvent laissés à eux-mêmes jusqu'à leur extinction naturelle.

Motivée par le besoin de prévoir les régimes d'incendies du futur, la communauté de modélisation régionale du climat a mobilisé des moyens considérables pour régionaliser les scénarios du changement climatique, et fournir des informations utiles des incendies au futur. Jones et al. (2022) ont présenté une revue complète sur les différents efforts en la matière. La figure 11, extraite de leur revue, montre l'évolution de nombre de jours par an favorables à l'apparition des incendies.

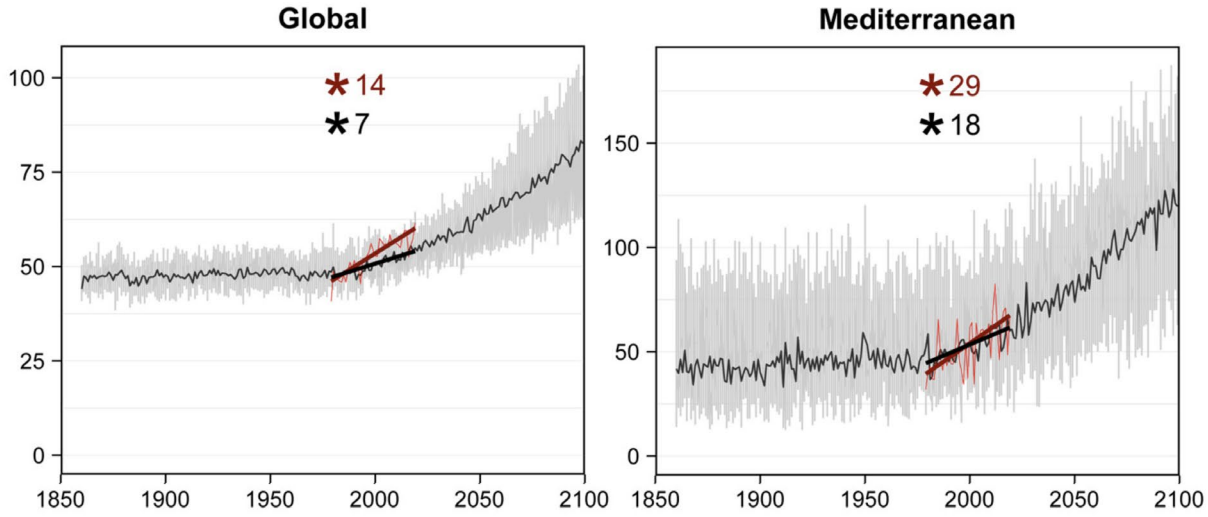


Figure 11 : Évolution de la durée annuelle de la saison forêt-météo, c'est-à-dire du nombre de jours par an où les conditions météorologiques sont favorables aux incendies de végétation, à l'échelle globale et sur la rive nord du bassin méditerranéen. Les courbes grises représentent les simulations climatiques CMIP5, leur moyenne est indiquée en noir, et les courbes rouges correspondent à ERA5, une réanalyse proche des conditions observées. À partir de 2006, les modèles suivent le scénario RCP8.5, correspondant à de fortes émissions de gaz à effet de serre. Les tendances linéaires pour 1979-2019 sont tracées en ligne épaisse pour ERA5 (en rouge) et la moyenne des modèles (en noir), tandis que les chiffres indiquent l'allongement estimé entre 1979 et 2019 : +14 jours globalement et +29 jours en Méditerranée dans ERA5, contre +7 et +18 jours dans les modèles qui montrent une légère sous-estimation pour l'allongement de la saison du feu. Les astérisques signalent une tendance statistiquement significative à 95 %. D'après Jones et al. (2022).

3.5.1. Les premières études

L'article de Marco Moriondo et al. (2006) est une étude qui commence à dater un peu, avec scénarios climatiques aussi anciens. Mais les résultats sont intéressants pour le pourtour méditerranéen. Ils utilisaient l'indice FWI intégré dans une simulation climatique régionale autour du bassin méditerranéen pour étudier l'impact potentiel du changement climatique sur les risques d'incendie. Deux tranches temporelles (1961-1990 et 2071-2100) ont été prises en compte pour représenter respectivement le climat actuel et futur. Deux scénarios d'émissions ont été sélectionnés : SRES A2 et B2. Les résultats ont indiqué une augmentation générale du risque d'incendie dans les deux scénarios futurs sur l'ensemble de la zone d'étude. L'augmentation du risque d'incendie était principalement due à trois facteurs : (1) l'augmentation du nombre d'années présentant un risque d'incendie ; (2) l'augmentation de la durée de la saison présentant un risque d'incendie ; (3) l'augmentation des événements extrêmes (par exemple, le nombre total de jours avec un FWI > 45 et les épisodes avec un FWI > 45 pendant 7 jours consécutifs) pendant la saison des incendies.

Le travail de Pitman et al. (2007) est une étude elle aussi un peu datée, qui recherche l'impact du changement climatique futur sur le risque d'incendies de forêts et de prairies en Australie à l'aide d'un modèle climatique régional à haute résolution, alimenté aux bords par les données d'un modèle climatique global. Deux scénarios d'émissions futures (SRES A2 et B2, relativement élevés et relativement faibles) sont utilisés pour 2050 et 2100, et quatre réalisations pour chaque période et chaque scénario d'émissions sont exécutées. Les résultats montrent une augmentation constante du risque d'incendie à l'échelle régionale en Australie, principalement due au réchauffement et à la réduction de l'humidité relative dans toutes les simulations, dans tous les scénarios d'émissions et pour toutes les périodes.

L'étude rapportée par Antonio Vázquez de la Cueva et al. (2012) est une étude également un peu datée maintenant. Le scénario utilisé est aussi ancien (SRES, A2, B2). En plus, la variable météorologique utilisée pour déduire les feux par régression fait appel à la seule température. Mais cette étude tentait de projeter les feux futurs en Espagne. Afin de quantifier l'activité future des incendies, des modèles de régression linéaire simples ont été élaborés à partir des températures mensuelles de l'air à la surface (comme prédicteurs) et de l'activité

enregistrée des incendies (prédictands) dans la péninsule ibérique. La période de contrôle est 1961-1990, tandis que le scénario SRES (A2 et B2) est utilisé pour 2071-2100 comme projection future. Sur la base de ces modèles, les ratios entre les estimations pour les scénarios climatiques SRES A2 et B2 et les estimations pour la période de référence ont été calculés. Les ratios sont estimés à 2,5 et 2 fois pour le nombre d'incendies, 4,6 et 3,4 pour la superficie forestière brûlée et 3,9 et 3 fois pour la superficie forestière boisée brûlée. Ces résultats indiquent une augmentation très significative de l'activité incendiaire pour le climat futur en Espagne.

Anna Karali et al. (2013) est aussi une étude très classique de ce type, qui utilise le FWI pour étudier l'avenir des risques d'incendie en Grèce. Une évaluation du FWI a été réalisée à partir des observations actuelles disponibles sur les incendies en Grèce sur une période de 15 ans, et l'indice s'est révélé capable de prédire la survenue d'incendies. Les valeurs seuils critiques du FWI pour la survenue d'incendies (un incendie par jour et par unité de surface) varient dans l'espace, augmentant à mesure que l'on se déplace du nord-ouest vers le sud-est de la Grèce. Trois valeurs seuils critiques de risque d'incendie ont pu être établies : FWI = 15 pour l'ouest de la Grèce, FWI = 30 pour le nord de la Grèce et FWI = 45 pour l'est et le sud de la Grèce (y compris les zones continentales orientales, les grandes îles de la mer Égée et la Crète). Ces seuils n'étaient pas applicables aux petites îles de la mer Égée en raison de la complexité du terrain local et du faible nombre d'incendies. Les projections futures du risque suggéraient une augmentation générale sur le domaine d'intérêt, avec un impact très fort dans l'est du Péloponnèse, l'Attique, la Macédoine centrale, la Thessalie et la Crète. Dans un avenir proche, 15 à 20 jours supplémentaires de risque d'incendie critique sont attendus dans l'ouest et le nord de la Grèce. Pour l'est et le sud de la Grèce, l'augmentation atteint jusqu'à 10 jours par an. Pour l'avenir lointain, le même schéma s'applique, avec une augmentation de 30 à 40 jours pour l'ouest et le nord de la Grèce et de 20 à 30 jours pour l'est et le sud de la Grèce.

L'étude de Turco et al. (2014) présente une méthodologie assez normale et classique. Elle établit un modèle statistique (sur la base de régression multiple linéaire) pour relier le feu au climat, et ensuite prévoir le futur du feu avec le climat futur issu des modèles climatiques. Turco et al. (2014) ont analysé les données climatiques et les données relatives aux incendies observées entre 1970 et 2007 dans le nord-est de l'Espagne, un environnement méditerranéen typique. La réponse du nombre d'incendies (NF) et de la superficie brûlée (BA) aux changements climatiques à long terme et interannuels a été étudiée à l'aide d'un modèle de régression linéaire multiple. Au cours de la période étudiée de quarante ans, la tendance observée pour le NF était négative. Il a en outre été démontré que, si l'on ne tenait pas compte des améliorations apportées à la gestion des incendies, le réchauffement climatique aurait à lui seul entraîné une tendance positive du NF. En revanche, pour la BA, la plus grande inflammabilité des combustibles est contrebalancée par les effets indirects du climat sur la structure des combustibles (c'est-à-dire des conditions moins favorables à la disponibilité et à la connectivité des combustibles fins), ce qui conduit à une tendance légèrement négative. Les travaux ont été étendus à l'évolution future des incendies. L'application du modèle d'incendie aux scénarios de changement climatique A1B basés sur un ensemble de modèles climatiques régionaux indique que l'augmentation des températures favorise une tendance positive de la NF si aucune amélioration supplémentaire n'est apportée à la gestion des incendies.

3.5.2. Régionaliser les scénarios de dernière génération

Dans les travaux de Fargeon et al. (2020), l'indice FWI quotidien est utilisé pour évaluer le risque d'incendie en France et établir des projections futures dans le cadre de scénarios de changement climatique (RCP4.5 et RCP8.5) fournis par l'initiative EURO-CORDEX couvrant la période 1995-2098. Trois indicateurs sont utilisés pour chaque année entre 1995 et 2098, pour une saison des incendies générique (juin à septembre, 122 jours) : (i) l'indice FWI moyen pendant la saison des incendies (FWIfs), qui caractérise le danger global pendant une saison des incendies typique ; (ii) le 90e centile saisonnier de l'indice FWI (FWI90), un niveau de danger d'incendie correspondant à la fourchette supérieure du danger d'incendie pendant la saison des incendies ; et (iii) la fréquence au-dessus du seuil 30 (FOT30), exprimée en nombre de jours où l'indice FWI est supérieur à 30 pendant une saison des incendies. Ce seuil fixe mesure la fréquence des conditions de danger d'incendie très élevé à extrême, à l'instar des seuils utilisés à des fins opérationnelles. Trois sources d'incertitude ont été quantifiées pour chaque indicateur à l'aide d'une méthode de décomposition de la variance. Le premier terme est lié à la variabilité interannuelle ou naturelle en l'absence de forçage externe. Le deuxième terme est l'incertitude du

modèle, qui est calculée à partir des simulations du modèle. Le dernier terme est l'incertitude du scénario, qui exprime l'ampleur du changement du danger d'incendie résultant des incertitudes concernant les scénarios futurs. Les résultats montrent une augmentation globale du FWI tout au long du siècle, les augmentations absolues les plus importantes étant observées dans la région méditerranéenne. L'incertitude du modèle était très élevée dans l'ouest de la France, précédemment identifié comme une région potentiellement sujette aux incendies dans le climat futur. En revanche, les fortes augmentations du FWI dans la région méditerranéenne ont montré une faible incertitude entre les modèles. En outre, l'analyse de la variabilité naturelle du FWI a révélé que les années extrêmes dans le climat actuel pourraient devenir beaucoup plus fréquentes d'ici la fin du siècle. Le FWI devrait émerger du contexte de variabilité naturelle d'ici le milieu du XXIe siècle, avec un risque d'incendie estival trois fois plus élevé lorsque l'anomalie de température estivale dépasse + 2 °C.

Tomás Calheiros et al. (2020) ont étudié l'évolution du risque d'incendies dans la péninsule ibérique en utilisant des indices météorologiques liés aux incendies dans le contexte du changement climatique. Ils ont utilisé un ensemble de simulations issues de 11 modèles EURO-CORDEX à haute résolution spatiale, pour deux périodes futures (2041-2070 et 2071-2100) et deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Les résultats suggèrent une augmentation significative du risque météorologique d'incendie à l'avenir, en particulier à la fin du printemps et au début de l'automne, ainsi que dans le sud et l'est de la péninsule ibérique. Le nombre de jours d'extrême devrait augmenter fortement pendant les mois d'été sur l'ensemble de la péninsule, mais aussi diminuer en mars et avril dans les régions du nord-ouest et du sud-ouest. Cela pourrait modifier la distribution spatiale des régimes d'incendie, avec un déplacement général vers le nord. Les résultats suggèrent des régimes d'incendie différents à l'avenir, avec un risque d'incendie plus élevé et une saison des incendies plus longue et plus intense.

Ruffault et al. (2020) projettent les incendies au futur pour le pourtour de la Méditerranée en établissant des régimes de temps favorable aux feux (FWT : Fire Weather Type). Ces régimes jouent le rôle d'intermédiaire pour projeter les incendies dans le futur. En effet, il suffit de projeter ces FWT au futur avec les modèles du climat pour connaître l'évolution future des incendies. Cette étude fait appel à huit modèles climatiques régionaux, participants de l'initiative EURO-CORDEX, en tenant compte des scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5. Il a été montré que les scénarios climatiques futurs impliquent une augmentation de la fréquence de deux types de conditions météorologiques propices aux incendies induits par la chaleur, qui ont été associées aux plus grands incendies de végétation de ces dernières années. Les types de conditions météorologiques propices aux incendies induits par la chaleur se caractérisent par des conditions de sécheresse et de chaleur combinées qui surviennent pendant les vagues de chaleur estivales, soit dans le cadre d'une sécheresse modérée (type vague de chaleur), soit dans le cadre d'une sécheresse intense (type sécheresse caniculaire). La fréquence des conditions météorologiques propices aux incendies induits par la chaleur devrait augmenter de 14 % d'ici la fin du siècle (2071-2100) dans le scénario RCP4.5, et de 30 % dans le scénario RCP8.5, ce qui suggère que la fréquence et l'étendue des grands incendies augmenteront dans tout le bassin méditerranéen.

Miller et al. (2023) utilisent un large ensemble de simulations d'un modèle climatique régional (CRCM5-LE) pour l'Europe centrale. Ils utilisent FWI pour évaluer le danger d'incendie pour cette région peu sujette aux incendies actuellement. Le scénario futur du climat est le RCP8.5 (*Representative Concentration Pathway*) de 1980 à 2099. La zone d'étude couvre quatre paysages hétérogènes, à savoir les Alpes, l'avant-pays alpin, les basses terres de l'escarpement sud-allemand et les chaînes de montagnes orientales de la forêt bavaroise. Il a été démontré que le CRCM5-LE est un ensemble de données adapté pour distinguer les tendances climatiques de la variabilité naturelle dans le risque d'incendie. Les résultats montrent de fortes augmentations du FWI dans les parties nord (escarpement sud-allemand et chaînes de montagnes orientales) de la zone d'étude pendant les mois d'été de juillet et août. Dans ces régions, le risque d'incendie élevé devient la condition médiane d'ici la fin du siècle, et les niveaux de risque d'incendie élevé surviennent plus tôt dans la saison des incendies. Les parties sud (Alpes et avant-pays alpin) sont moins fortement touchées par les changements du risque d'incendie que les parties nord. Cependant, ces régions atteignent leur temps d'émergence (ToE) au début des années 2040 en raison du risque d'incendie très faible actuellement. Dans les parties nord, la tendance du changement climatique ne dépasse la variabilité naturelle qu'à la fin des années 2040. Il a été aussi montré que les événements FWI centennaux actuels se produiront tous les 30 ans d'ici 2050 et tous les 10 ans d'ici la fin du siècle. Ces résultats

soulignent le risque de graves incendies à l'avenir en Europe centrale, qui n'est actuellement pas très exposée aux incendies, et démontrent la nécessité d'une gestion des incendies même dans les régions au climat tempéré.

Gerberding et Schirpke (2025) utilisent des méthodes statistiques avec GIS pour déduire les feux à partir d'un ensemble d'informations pour les Alpes européennes et les régions environnantes. Les résultats suggèrent que le risque d'incendie dépend principalement de la fréquence des coups de foudre, de la température moyenne annuelle et de la saisonnalité des précipitations. Dans l'ensemble, les résultats indiquent une augmentation future du risque, qui est déjà significatif dans le scénario SSP1-2.6 (+15,5 %), tandis que les augmentations les plus importantes se produisent dans les scénarios SSP3-7.0 (30,6 %) et SSP5-8.5 (35,4 %). Cependant, si les impacts sont moins prononcés dans les régions déjà sujettes aux incendies du sud-ouest de la France, la probabilité de risque d'incendie augmentera considérablement dans les régions du nord et de l'est. Les conclusions soulignent la nécessité urgente de relever ces défis liés au climat par la prise de décisions et la gestion grâce à une gestion forestière intelligente en matière d'incendies. Néanmoins, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour surmonter les limites actuelles liées à la disponibilité des données et aux incertitudes des scénarios futurs.

Les incendies de végétation sont une préoccupation croissante dans le contexte du changement climatique, qui pourrait accroître la fréquence et l'intensité des conditions qui leur sont propices. Lanet (2025) a évalué ici l'évolution du risque d'incendie en été dans le sud-ouest de la France selon trois scénarios climatiques (trajectoires de concentration représentatives RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5), à l'aide de six modèles climatiques. Outre l'indice FWI (Fire Weather Index), largement utilisé par les services opérationnels pour évaluer le danger quotidien d'incendie, un indice complémentaire, le SM6-T3-VPD3 (humidité du sol intégrée sur 6 mois, température de l'air en surface et déficit de pression de vapeur intégrés sur 3 mois), est également utilisé pour évaluer les conditions de chaleur et de sécheresse prolongées. Les résultats indiquent que dans le scénario d'émissions les plus élevées, la probabilité d'événements extrêmes combinant chaleur et sécheresse augmente de 0,04 à 0,49 en août au cours du XXIe siècle. Même dans le scénario d'émissions les plus faibles, leur probabilité augmente de 0,03 à 0,15. Cette étude souligne donc l'importance et la complémentarité des stratégies d'atténuation et d'adaptation pour lutter contre les risques d'incendies.

3.5.3. En relation avec le service climatique de Copernicus

El Garroussi et al. (2024) analysent la sensibilité de l'influence des changements de précipitations et de température sur le risque d'incendie à l'échelle paneuropéenne. Ils explorent aussi l'avenir des feux en Europe en considérant leur relation avec les conditions climatiques (chaleur et sécheresse). Ils utilisent l'indice météorologique incendie (FWI) calculé à partir de la réanalyse climatique ERA5 et des données simulées dans le cadre de CMIP6 pour la projection future du climat (scénario modéré). FWI a été calculé à travers le modèle mondial de prévision des incendies (GEFF) de l'ECMWF. L'ensemble de données est disponible via le *Copernicus Climate Data Store*. Le FWI évalue le risque potentiel d'incendie en intégrant des facteurs météorologiques clés, tels que la température, l'humidité, la vitesse du vent et les précipitations, fournissant ainsi une mesure quantitative de l'inflammabilité du paysage.

En complément d'information, les données FWI issues des réanalyses de l'ECMWF sont aussi disponibles et récupérables librement. Ces données avec une couverture globale sont décrites dans Vitolo et al. (2019). Elles peuvent être considérées comme un produit complémentaire aux prévisions du risque d'incendie publiées quotidiennement par le Système mondial d'information sur les feux de forêt (GWIS) dans le cadre du programme européen Copernicus. Il faut noter qu'une amélioration a été incorporée dans le calcul du code de sécheresse, comme décrite dans Megan McElhinny et al. (2020). Les données météo sont celles d'ERA5, au lieu d'ERA-Interim dans Vitolo et al. (2019).

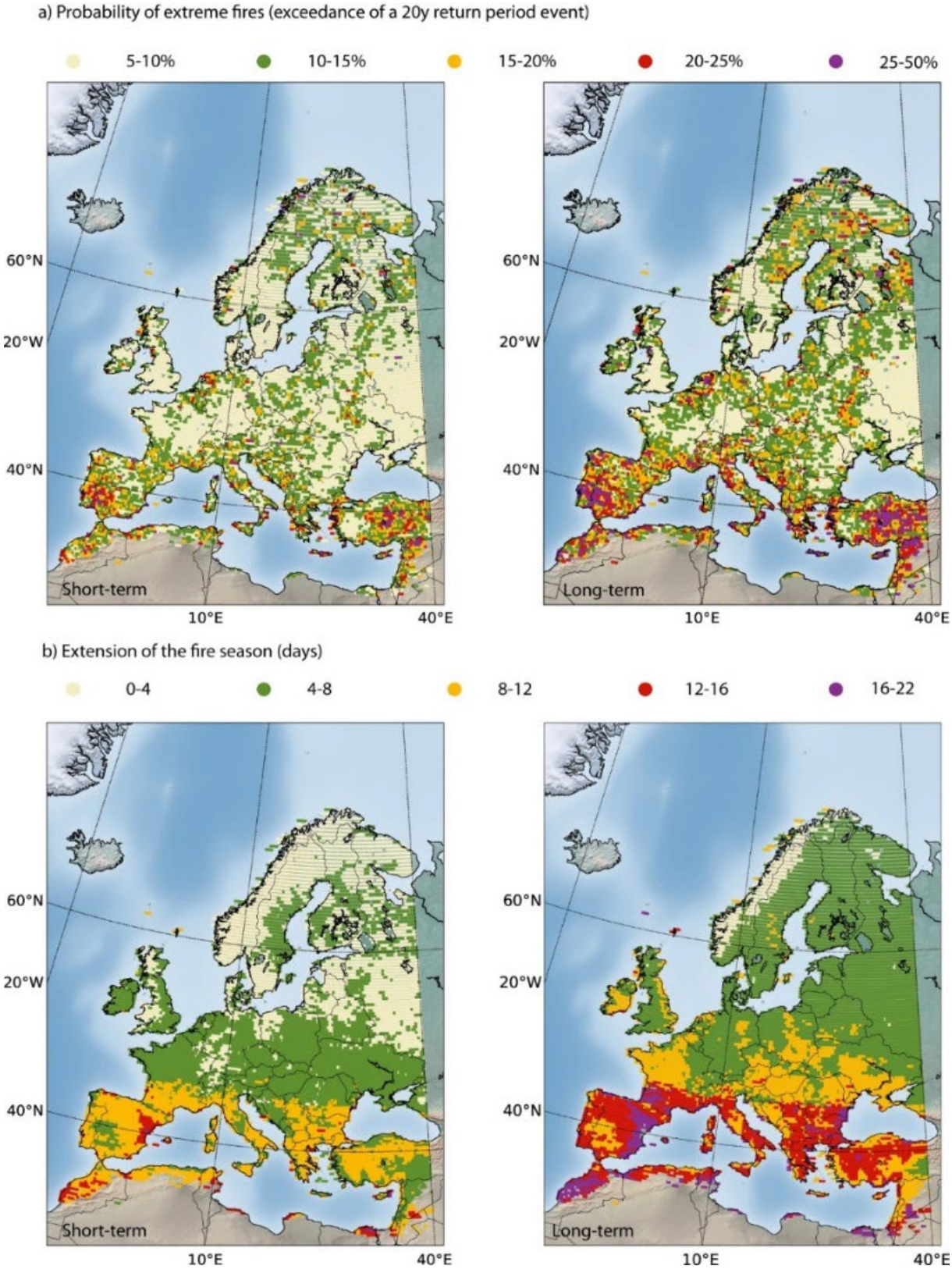


Figure 12 : (a) Probabilité prévue d'événements incendiaires extrêmes avec un niveau de récurrence de 20 ans (ou une probabilité de survenue de 5 %) dans le climat actuel. (b) Extension prévue de la saison des incendies en Europe. La colonne de gauche représente la période à court terme (2036-2065), tandis que la colonne de droite représente la période à long terme (2070-2099). Les statistiques sont issues des scénarios les plus probables projetés par les simulations multi-modèles du CMIP6. L'analyse révèle que plus de 50 % de l'Europe devrait connaître au moins un doublement de la probabilité d'événements extrêmes, accompagné d'un allongement minimum de la saison des incendies de cinq jours d'ici la fin du siècle. D'après El Garroussi et al. (2024).

Dans l'étude de El Garroussi et al. (2024), le niveau de récurrence sur 20 ans de l'indice FWI sert de seuil critique pour identifier les événements météorologiques extrêmes liés aux incendies. En d'autres termes, un événement extrême est défini comme un événement présentant une probabilité de 5 % par an. La durée des conditions propices aux feux est alors définie comme le nombre de jours où l'indice FWI dépasse la moitié de ce seuil. En prenant les conditions climatiques actuelles comme référence, il est alors possible d'évaluer comment la probabilité d'atteindre ou de dépasser ce seuil pourrait évoluer selon différents scénarios de changement climatique. Cette analyse permet de quantifier les changements potentiels de l'intensité et de la durée des conditions météorologiques extrêmes propices aux feux dus au changement climatique. L'étendue spatiale de l'augmentation de la probabilité d'incendies extrêmes dans les scénarios à court et à long terme est tout d'abord évaluée à la figure 12a, parallèlement aux périodes prolongées de conditions météorologiques propices aux incendies, montrées à la figure 12 b. L'analyse indique que plus de la moitié de la superficie totale de l'Europe devrait connaître un doublement de la probabilité d'événements incendiaires extrêmes, passant de 5 % à 10 %. De plus, certaines régions connaîtront des foyers localisés caractérisés par une multiplication par dix de cette probabilité (passant de 5 % actuellement à 50 % selon le scénario CMIP6 le plus probable).

La région MED, qui englobe l'est de la Turquie, la Grèce, le sud de l'Italie, la péninsule ibérique, le sud de la France et l'Afrique du Nord, devrait connaître la hausse la plus importante du risque d'incendie. Par ailleurs, une zone à risque accru s'étend le long du littoral atlantique de l'Europe centrale et septentrionale. À l'inverse, c'est en Europe septentrionale que l'augmentation du risque est la moins marquée. Dans la plupart des parties de cette région, l'augmentation maximale attendue est de 20 %, soit une multiplication par 4 en nombre (passant d'un événement tous les 20 ans à un tous les cinq ans). Il est toutefois essentiel de noter que la zone boréale est très sensible aux variations des précipitations, et que des périodes de sécheresse prolongées pendant la saison des incendies peuvent avoir des conséquences catastrophiques pour cette région.

À court terme, la saison des incendies devrait s'allonger de 12 à 16 jours dans la péninsule ibérique, l'est de l'Espagne, le sud de la France, la Grèce et l'ouest de la Turquie, tandis que l'Europe centrale devrait connaître une augmentation de 4 à 8 jours. À long terme, l'Europe centrale connaîtra une augmentation modérée de quatre jours supplémentaires, mais la région MED, qui englobe l'Afrique du Nord, l'est de l'Espagne, le sud de la France, l'est de la Grèce et l'ouest de la Turquie, devrait subir une augmentation substantielle de la durée des feux, avec des hausses allant de 12 à 22 jours. Cette tendance indique que, d'ici la fin du siècle, jusqu'à 18 % de la superficie terrestre de l'Europe du Sud pourrait être touchée par des incendies catastrophiques aussi fréquemment qu'une fois tous les deux ans. De plus, les projections climatiques révèlent l'émergence d'une vulnérabilité accrue aux incendies extrêmes dans des régions de l'Europe du Sud jusqu'alors moins touchées.

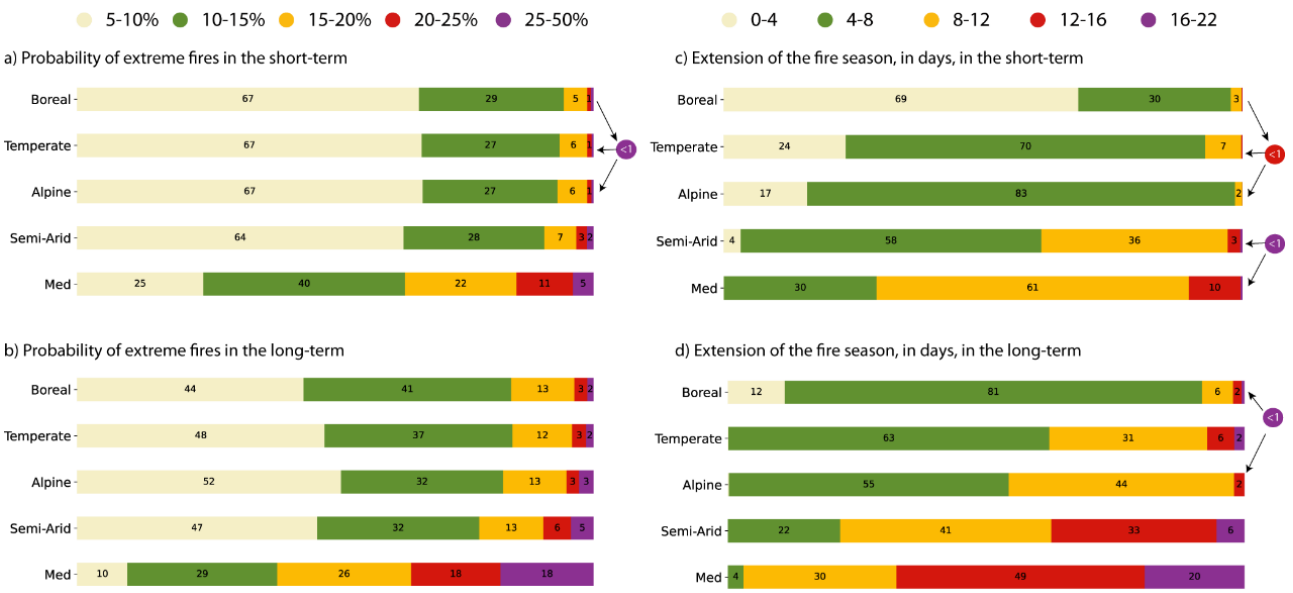


Figure 13 : Augmentation de la probabilité d'incendies extrêmes (à gauche, définis comme probabilité d'occurrence de 5 % par an) et de la durée de la saison des incendies (à droite, définie comme le nombre par an des jours avec l'indice IFM dépassant la moitié du niveau de retour de 20 ans), pour le court terme (en haut) et le long terme (en bas). Les résultats sont exprimés en pourcentage de superficie occupée pour différentes intensités du changement. Ces statistiques ont été établies à partir du scénario le plus probable issu des simulations multi-modèles du CMIP6 pour tous les points situés au sein de chacune des 5 régions (boréale, tempérée, alpine, semi-aride et méditerranéenne). D'après El Garroussi et al. (2024).

Les résultats des projections à court terme et à long terme sont regroupés selon les cinq régions européennes (voir figure 13a, b). Dans la plupart des régions, environ deux tiers (66 %) du territoire devraient présenter une probabilité de 5 à 10 % de voir se produire de tels événements à court terme. Cependant, la région MED devrait être confrontée à des risques plus élevés, 40 % de sa superficie présentant une probabilité de 10 à 15 %. Environ 11 % de la région MED pourrait connaître des probabilités d'incendies extrêmes comprises entre 20 % et 25 %, tandis que 5 % pourraient présenter une probabilité de 25 à 50 %. D'ici 2100, l'étendue des zones présentant un risque moyen devrait augmenter dans les cinq régions. Dans la région MED, la superficie exposée à un risque moyen devrait tripler, et dans les quatre autres régions, elle devrait doubler, passant de 6 % à 12 %. Les projections climatiques les plus probables du CMIP6 indiquent un allongement de la saison des feux dans toute l'Europe (fig. 13c, d). Dans la région MED, la saison des feux devrait s'allonger d'au moins une semaine, un cinquième de cette région pouvant connaître une prolongation de 20 jours d'ici la fin du siècle (fig. 13d). De même, la partie nord de l'Europe devrait connaître une prolongation de la saison des feux d'environ une semaine.

3.5.4. Une projection du risque d'incendies pour la France

Nous avons récupéré les données Euro-Cordex du service Copernicus « Climate Data Store » régionalisées par le modèle RCA (Rossby Center atmosphere, Institut Suédois Météo-Hydro) qui est emboité dans 5 modèles globaux pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. L'indice FWI calculé par le modèle du climat est utilisé pour caractériser le danger des incendies. La saison des feux est donc le nombre de jours par an avec le FWI dépassant le seuil de 30. La figure 14 montre la saison du risque d'incendies pour la France métropolitaine et ses variations à différentes échéances. Pour la période de référence, 1979/1998, on peut voir que la saison des incendies peut atteindre 90 jours sur la côte méditerranéenne, tandis qu'elle est inférieure à 5 jours pour environ 40 % du territoire au nord. Pour le scénario RCP8.5 et en fin du siècle, le rallongement de la saison d'incendies est supérieur à 30 jours au sud, et de 10 à 20 jours au nord. Cette situation pose des défis au sud comme au nord. La politique actuelle de lutte contre les incendies, associée avec l'actuel équipement, sera-t-elle saturée pour le sud, pourtant préparé aux incendies ? L'extension du risque d'incendies vers le nord, peu préparé aux incendies actuellement, mettra le nord en plus grand danger. On note toutefois que le scénario RCP4.5 limite

fortement l'augmentation du danger par rapport au RCP8.5, ce qui montre l'intérêt d'une politique de réduction de l'émission du carbone. Ceci est surtout visible sur la figure 15 qui montre les séries temporelles du nombre de jours où le risque d'incendies est élevé avec l'indice FWI dépassant le 30. Les courbes RCP8.5 ne divergent pas beaucoup de RCP4.5 avant 2050. Mais après 2050, le RCP8.5 s'envole tandis que le RCP4.5 connaît une progression très lente.

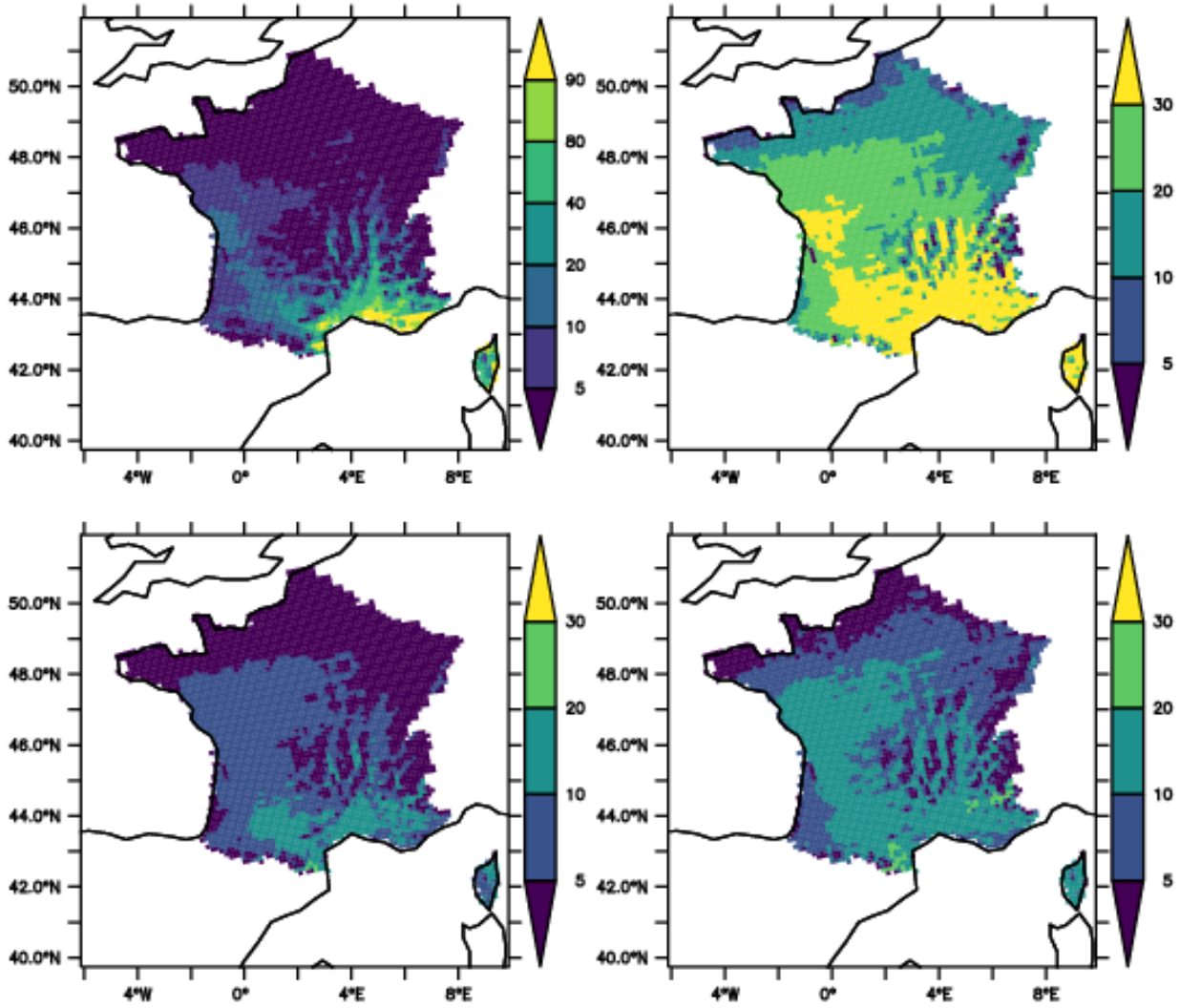


Figure 14 : En haut à gauche, carte indiquant le nombre de jours par an durant lesquels l'indice forêt-météo dépasse 30 (risque élevé d'incendie) pour le climat historique (1979-1998). En haut à droite, changements à la fin du siècle (2079-2098) selon la projection RCP8.5 (dit pessimiste ou sans réduction des émissions). Les deux graphiques en bas donnent les changements pour le scénario RCP4.5 et pour deux échéances différentes : 2029-2048 et 2079-2098. Ces graphiques sont issus des simulations du modèle régional RCA (SMHI, Suède), emboîté dans 5 modèles globaux CMIP5 (CNRM, EC-Earth, UK Met Office, IPSL et MPI). Les données ont été téléchargées depuis le « Climate Data Store » (https://cds.climate.copernicus.eu/). Le réchauffement moyen, par rapport au pré-industriel, au niveau global (France métropolitaine, en parenthèse) de ces 5 modèles est de 0,56 (0,59) °C pour la période historique 1979-1998, 4,6 (5,0) °C pour RCP8.5/2079-2098, 1,9 (2,1) °C pour RCP4.5/2029-2048, et 2,8 (2,9) °C pour RCP4.5/2079-2098. On peut constater que La Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC, Corre et al. 2025, https://doi.org/10.1016/j.cliser.2025.100553), définie par le ministère de la Transition écologique est, pour ces 5 modèles du climat, entre RCP8.5 et RCP4.5 pour la fin du siècle 2079-2098.

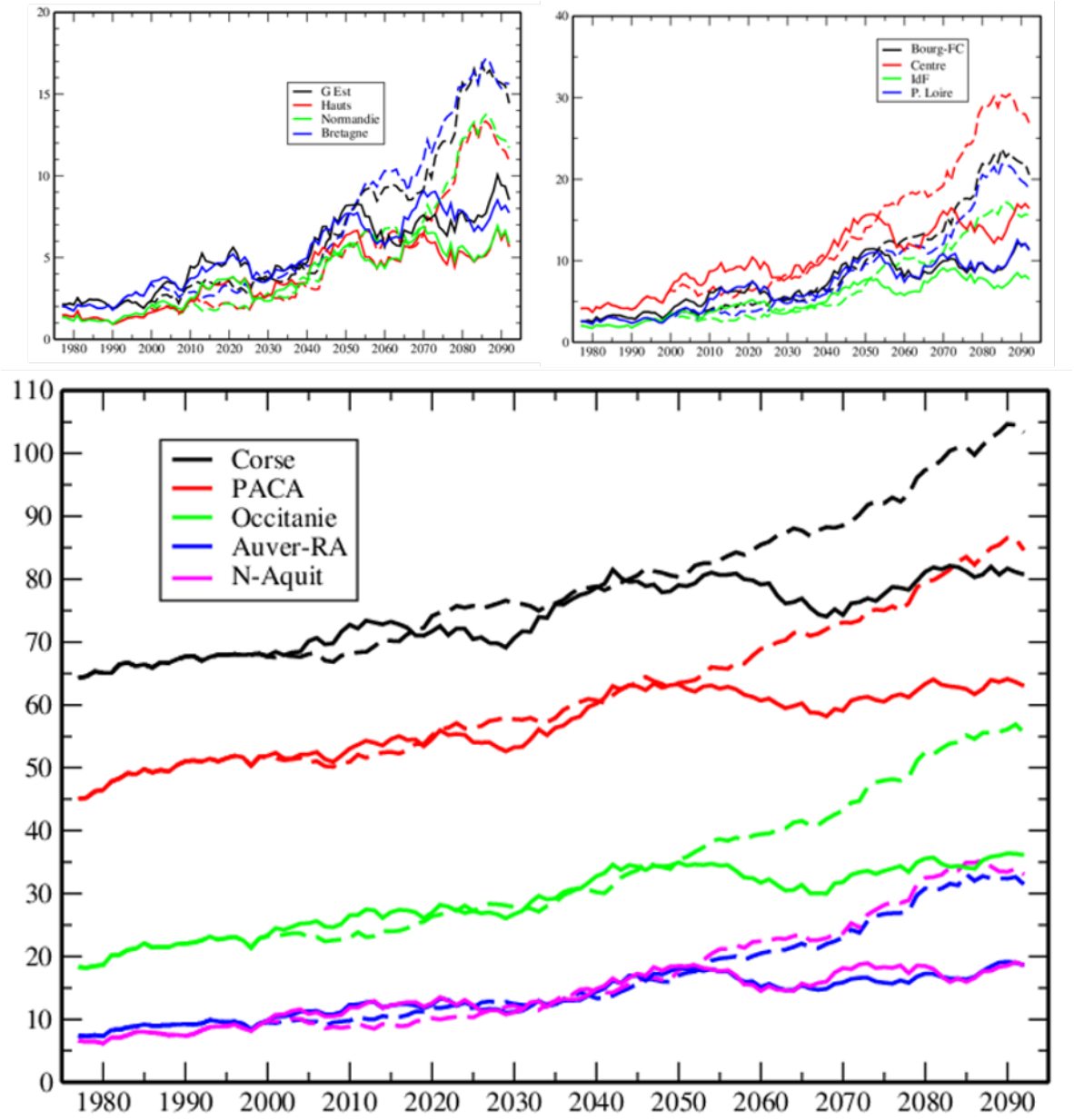


Figure 15 : La même variable que sur la Figure 14, c'est-à-dire le nombre annuel de jours où l'indice FWI dépasse 30. Mais sont ici représentées les séries temporelles (1975-2095) moyennes sur chaque région administrative de la France métropolitaine. Les courbes pleines représentent l'historique (jusqu'à 2005) puis le scénario RCP4.5, tandis que les courbes pointillées représentent le scénario RCP8.5.

Ces projections indiquent non seulement une augmentation du nombre de jours présentant un danger incendie élevé, mais également une extension géographique des conditions favorables aux incendies vers des régions françaises historiquement moins exposées. L'intensification du danger est robuste en région méditerranéenne, tandis que les incertitudes sont plus importantes concernant les régions qui pourraient devenir durablement et régulièrement concernées par les incendies (Fargeon et al. 2020). Cette évolution dépend en outre des trajectoires climatiques mais aussi des dynamiques de végétation, d'occupation des sols et, plus généralement, des facteurs non climatiques qui modifient les régimes de feu.

3.5.5. Correction multivariée de biais pour un indicateur composé

Pour faire la projection future des incendies dans les modèles climatiques qui ne possèdent pas de module d'incendies explicite, la plupart des études font appel à l'indicateur FWI, calculable à partir de plusieurs variables météorologiques. Ces multiples variables entrent en jeu pour définir un phénomène composé. Aucun modèle du climat n'est capable de reproduire les variables météo sans erreur. Il faudrait donc recourir à la correction de biais avec, si possible, une correction multivariée. De nombreuses méthodes existent pour prendre en compte

les relations intrinsèques entre les variables pour pouvoir les corriger simultanément. FWI peut être considéré comme un indicateur composé. Dans Wei Yang et al. (2015), une approche de mise à l'échelle basée sur la distribution a été développée comme outil de post-traitement visant à corriger les biais systématiques dans les résultats des modèles climatiques. Les effets de l'outil de post-traitement sur l'humidité relative et la vitesse du vent ont été étudiés en plus des variables principales que sont les précipitations et la température. Ainsi, le FWI a été utilisé pour évaluer l'influence des conditions météorologiques sur la teneur en humidité des couches de combustible et le risque de propagation des incendies. Leur étude porte sur l'Europe du Nord et les résultats de projection future montrent que le sud de la Suède devrait connaître un risque d'incendie plus élevé qu'aujourd'hui, tandis que le nord de la Suède devrait connaître un risque d'incendie de forêt plus faible.

Une autre étude similaire avec correction de biais multivariée a été rapportée par Piyush Jain et al. (2020) pour une régionalisation du climat en Colombie-Britannique et Alberta au Canada. Ils prennent en compte à la fois une période de référence historique (1990-2000) et trois périodes futures (2020-2030, 2050-2060 et 2080-2090). Les données historiques utilisées pour calibrer la procédure statistique de correction comprennent les données des stations météorologiques et les données météorologiques issues de la réanalyse régionale nord-américaine (NARR), tandis que les projections climatiques futures sont le résultat de trois modèles climatiques régionaux, correspondant à différentes paramétrisations de modèles et obtenues par réduction d'échelle à partir du modèle communautaire du système terrestre du NCAR (NCAR Community Earth System Model) dans le cadre du scénario RCP 8.5. Le risque d'incendie est représenté par le nombre annuel de jours où les valeurs de l'indice FWI sont supérieures à 19. Les résultats montrent que la procédure de correction conduit à un nombre plus élevé de jours de risque dans la plupart des sites par rapport aux estimations utilisant les résultats non corrigés du modèle, et que les trois modèles RCM indiquent des augmentations positives du risque d'incendies pour les périodes 2050—2060 et 2080—2090.

3.6. La transformation des territoires : l'autre facteur d'évolution du risque d'incendie

À tous les niveaux, l'accroissement de l'empreinte écologique de l'espèce humaine sur les systèmes environnementaux conduit à des transformations profondes des territoires. Même si les dynamiques territoriales s'appréhendent plus souvent à des niveaux régionaux ou locaux que le changement climatique global, ces transformations agissent en synergie ou parfois en opposition au changement climatique pour conduire à une évolution des niveaux de risque le plus souvent défavorable (Syphard et al. 2013 ; Vilar et al. 2016). Le seul accroissement démographique humain de nombreux territoires méditerranéens ruraux, autrefois peu peuplés, se traduit directement par l'augmentation et la diffusion, au sein des espaces de végétation combustible, d'enjeux exposés, mais aussi de l'aléa de départ de feu d'origine humaine (voir Chap. 1, Interfaces). Le plus souvent, les transformations socio-économiques se traduisent par de profonds changements de la physionomie des paysages, dont la structure détermine partiellement l'aléa structurel.

Le changement d'occupation et d'utilisation des sols (Land Use Land Cover Change — LULCC) constitue donc le deuxième facteur majeur d'évolution du risque structurel, après le changement climatique, à tous les niveaux d'échelle, depuis l'échelle globale (planétaire) jusqu'à l'échelle locale. Deux dynamiques principales sont déterminantes dans l'évolution du risque :

• l'évolution des écosystèmes combustibles, sous la double influence du changement climatique et de la pression anthropique. L'un des médiateurs de ces influences est l'évolution du régime de feux lui-même mais aussi la dégradation de l'état phytosanitaire de plusieurs écosystèmes (Amérique du Nord, certaines zones forestières tempérées et méditerranéennes européennes...) ;

• l'évolution des classes d'occupation du sol, déterminée par leur utilisation anthropique, mais aussi par les dynamiques écosystémiques (fermeture des espaces d'origine pastorale, par exemple) (Parente et al. 2023).

La déprise agro-pastorale, amorcée à la fin du XIXe siècle et accélérée depuis les années 1950 en France, touche pour l'essentiel les régions méditerranéennes et les régions de montagne peu productives. Elle entraîne une

remontée biologique favorisant les landes, les garrigues et les maquis, ainsi que les boisements spontanés et les reboisements à vocation sylvicole.

Cet accroissement de la couverture ligneuse (buissons et arbres) augmente la charge en combustible et la connectivité incendiaire des paysages. Cela contribue fortement à modifier le risque de propagation des incendies (Salis et al. 2022).

Cet abandon d'espaces agricoles conduit à la formation transitoire de friches chargées d'une biomasse fine favorisant les éclosions, alors que la fermeture des espaces pastoraux conduit à des formations arbustives puis arborescentes sur de grandes surfaces. Le niveau de cette dynamique est très variable en fonction des contextes : encore forte dans certaines parties de l'Europe méditerranéenne (Sardaigne, nord de l'Espagne), elle est presque aboutie en France méridionale.

Au final, ces processus de déprise, associés aux reboisements des terrains de montagne (RTM) et aux reboisements du Fonds forestier national (FFN), ont conduit à une multiplication par presque deux de la surface forestière française depuis le « minimum forestier », situé vers le milieu du XIXe siècle, passant de 8,9 millions d'ha en 1840 à 17,6 millions d'ha en 2024. Cette augmentation s'est poursuivie, avec même une accélération à partir des années 1980 (source : IGNF, https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique11).

Néanmoins, peu de résultats formels permettent de relier l'augmentation de la surface forestière à l'augmentation des incendies (en nombre ou en surface brûlée), tant les autres facteurs, dont le changement climatique, l'aléa d'éclosion anthropique ou l'amélioration de l'efficacité de la lutte, peuvent être déterminants (Ganteaume et al. 2013).

D'autres dynamiques d'utilisation et d'occupation du sol peuvent réduire le risque. C'est évidemment le cas des aménagements anti-incendie : coupures de combustibles, débroussaillement, réouverture d'espaces anciennement agricoles ou pastoraux... Une réduction de la biomasse liée à une mauvaise adaptation des écosystèmes aux nouvelles conditions climatiques peut aussi conduire, à long terme et dans certains contextes, notamment méditerranéens, à une réduction progressive du risque d'incendie, après la phase de maximisation due à l'accumulation de biomasse morte.

L'accroissement ligneux des territoires anciennement agro-pastoraux, les politiques publiques et le changement climatique en cours entrent en collision. Certains facteurs peuvent inhiber momentanément l'effet d'un autre (e.g. déprise agro-pastorale versus politiques publiques), alors que d'autres facteurs peuvent agir en synergie (e.g. déprise agro-pastorale et changement climatique). Mais ces synergies ou inhibitions peuvent fonctionner par effet de seuil et produire des trajectoires non linéaires. Cela modifie considérablement le risque de feu de végétation au XXIe siècle, par comparaison avec le contexte du XIXe siècle, qui est celui où les surfaces boisées étaient les plus réduites, les politiques publiques concernant les usages des territoires les moins développées et le climat le moins risqué, car moins chaud et moins évaporant.

La France a vu une nette diminution du nombre de feux et des surfaces brûlées durant les trois dernières décennies (Dupuy et al. 2020). Cette tendance est généralement attribuée aux bonnes performances des doctrines de lutte contre l'incendie (Lahaye et al. 2018), en particulier de la stratégie d'attaque massive des feux naissants, fondée sur le « guet aérien armé » (Battesti 1997), bien que la démonstration formelle de causalité ne soit pas toujours clairement établie. Pour l'avenir, l'augmentation de la fréquence des feux extrêmes, mais aussi l'extension des zones de vulnérabilité, en particulier aux interfaces, ainsi que la dispersion des enjeux sur les territoires (et des moyens de lutte disponibles), rendent incertaine la soutenabilité de cette tendance et de cette doctrine (Curt et Frejaville 2018 ; Ruffault et Mouillot 2015) (voir également Chap. 8 Urbanisme, aménagement et gouvernance). Montrant les limites des capacités d'intervention, le feu de Rognac dans les Bouches-du-Rhône (10 juillet 2016, 2 663 ha) a détruit une trentaine d'habitations, alors qu'un autre sinistre menaçait les installations pétrolières sur la commune d'Istres (feu d'Istres du 10 juillet 2016, 30 ha). Les incendies en Gironde à partir du 7 juillet 2022 (La Teste-de-Buch, 5 709 ha, et Landiras I, 12 552 ha), ainsi que les incendies de la première quinzaine du mois de juillet 2025, cumulant des feux partiellement simultanés affectant fortement des enjeux d'interface dans les Bouches-du-Rhône (feu de Marseille/Les Pennes-Mirabeau à partir du 8 juillet 2025),

l'Hérault (feu de Fabrègues à partir du 5 juillet) et l'Aude (feu de Narbonne à partir du 7 juillet), corroborent ces inquiétudes.

4. Conclusions et perspectives

Le risque incendie, autrefois façonné par des régimes naturels, subit aujourd'hui une nette transformation sous l'effet conjugué du changement climatique et des dynamiques anthropiques régionales et locales. Les projections confirment une extension géographique du risque, même dans des zones historiquement épargnées, ainsi qu'une intensification des feux extrêmes. Même si des incertitudes persistent, ces tendances questionnent les stratégies de gestion du risque jusque-là efficaces en France, tout particulièrement dans les zones d'interface où les enjeux de prévention sont majeurs et la maîtrise des évolutions de l'occupation des sols, un véritable défi.

Le nombre d'incendies sévères a globalement augmenté durant les dernières décennies (Cunningham et al. 2024), à l'exception des régions où les interventions humaines directes ont un effet plus important. La zone méditerranéenne du sud de l'Europe fait partie de ces régions d'exception (Turco et al. 2016). Cependant, les projections futures des scénarios climatiques prévoient toutes une augmentation du risque d'incendie associé aux conditions météorologiques. Qui l'emportera à l'avenir ? Quelles sont les incertitudes respectives (Fargeon et al. 2020) ? Ces questions constituent encore un domaine actif de recherche. La capacité des mesures de gestion humaines à continuer de contrebalancer cette aggravation climatique à l'échelle régionale reste une inconnue fondamentale pour les projections futures.

Le rôle des biomasses, en tant que nourriture des incendies, leurs propriétés inflammables et combustibles, ainsi que leurs trajectoires d'accumulation et de déstockage, méritent aussi des investigations mieux documentées et plus fines, prenant en compte les spécificités des écozones et des bioclimats. En effet, le changement climatique futur peut modifier la disponibilité et les caractéristiques des combustibles, donc les régimes d'incendie. Turco et al. (2018) montrent que la relation climat-incendies peut être affectée par la variation de la végétation, introduisant une rétroaction avec un effet d'atténuation (moins de biomasse à brûler) dans la projection des incendies en zone méditerranéenne. Dans une étude sur la Californie, Syphard et al. (2018) montre aussi que l'omission de la dynamique de la végétation pourrait introduire une source majeure d'incertitude dans les projections des incendies, car l'humidité, l'abondance et la structure du combustible sont des facteurs clés qui contrôlent l'activité des incendies. L'intégration de la dynamique des végétations dans les modèles prédictifs constitue une deuxième lacune cruciale. Le changement climatique modifie directement les trajectoires d'accumulation et la disponibilité de la biomasse combustible et l'omission de ces interactions introduit une source d'incertitude majeure dans la cartographie des risques futurs. L'aridité croissante dans le climat futur peut réduire la productivité végétale et limiter la quantité de combustible disponible, introduisant ainsi une rétroaction capable d'atténuer considérablement l'intensification prévue des incendies, notamment dans les écosystèmes méditerranéens.

Enfin, l'évaluation globale de la menace d'incendies est limitée par les méthodes de collecte de données et le choix des métriques. L'attribution et la détection précises des tendances se heurtent à la faible profondeur temporelle des données satellitaires continues et à la disparité des archives historiques (Abatzoglou et al. 2019). L'utilisation de la seule variable sur les surfaces brûlées est très partielle, car cette métrique peut s'avérer trompeuse, puisqu'elle masque, derrière une baisse apparente des surfaces totales au niveau mondial, une intensification avérée des événements extrêmes lorsqu'on mesure leur puissance radiative (Cunningham et al. 2024).

Pour terminer ce chapitre, on doit admettre qu'un changement de la variabilité climatique peut également, sinon plus, nous poser de nouveaux défis à relever. Swain et al. (2025) utilisent l'indice normalisé de précipitations et d'évapotranspiration (SPEI, une mesure de la sécheresse) pour compter le nombre d'événements dits « coup de fouet », dont la rapidité de transition entre états secs et humides dépasse un seuil correspondant à une période de retour de 10 ans. Ils montrent que le nombre d'événements de ce type a augmenté de 8 à 66 % depuis le milieu du XXe siècle à l'échelle du globe. De nouvelles augmentations sont attendues avec le réchauffement en cours, estimées entre 52 et 113 % pour un réchauffement climatique global de +3 °C. Compte tenu des impacts historiques observés de ces événements de coup de fouet hydroclimatique, il est urgent de comprendre ces changements de volatilité et de s'y préparer. La volatilité hydroclimatique peut entraîner des effets géophysiques

et sociétaux distincts et d'une ampleur supérieure à ceux associés à des événements isolés humides et secs. Une augmentation de cette volatilité est donc susceptible de mettre à l'épreuve non seulement les infrastructures de gestion de l'eau et des inondations, mais aussi les systèmes de gestion des catastrophes, d'intervention d'urgence et de santé publique. Les infrastructures actuellement en place ayant été conçues pour les conditions extrêmes du milieu du XXe siècle, avec un niveau du réchauffement global peu remarquable, elles sont vraisemblablement mal adaptées aux changements induits par le changement climatique futur.

5. À retenir

Le risque incendie évolue sous l'effet combiné du changement climatique, des dynamiques de végétation et des transformations des usages et de l'occupation des sols. Le changement climatique n'engendre pas à lui seul le risque, mais il accroît nettement le danger, allonge les saisons de feu et augmente la probabilité d'épisodes extrêmes :

En Europe, plus de 50 % du territoire pourraient connaître d'ici la fin du siècle un allongement d'au moins 5 jours de la saison des incendies, et la France de 5 à 22 jours selon les régions. Dans le bassin méditerranéen européen, 36 % des surfaces pourraient voir la probabilité d'incendies extrêmes multipliée par 4 à 10 à la fin du siècle (El Garroussi et al. 2024).

Parallèlement, la déprise agricole, la fermeture des milieux et l'urbanisation accroissent les interfaces ville — espace naturel, donc à la fois l'exposition des enjeux et les opportunités d'allumage d'origine humaine. En France métropolitaine, ces transformations s'inscrivent dans un contexte d'augmentation de la surface boisée, impliquant aussi une accumulation de biomasse combustible.

En conséquence, davantage de territoires sont concernés, avec une extension vers des régions historiquement moins exposées. Il y a également des feux potentiellement plus difficiles à contrôler et une pression croissante sur les zones habitées, en particulier aux interfaces.

Le feu est un élément naturel du système terrestre. Les interactions fortes et auto-renforçantes entre le climat, la végétation et les incendies ont donné naissance à des « régimes de feu » distincts, définis par la fréquence temporelle, l'étendue et la répartition spatiale, le comportement caractéristique et les effets environnementaux des feux de végétation. Ils sont influencés par de multiples facteurs et il existe des interactions complexes entre les activités humaines, le climat et la végétation. Il est d'autant plus difficile de les démêler que les interactions se produisent à des échelles de temps différentes.

Les incendies nécessitent la confluence d'au moins quatre facteurs (allumages, combustibles continus, sécheresses et conditions météorologiques appropriées), tous susceptibles d'être affectés par les changements globaux. Ainsi, les régimes d'incendie changent dans de nombreux écosystèmes, mais souvent pour des raisons différentes. Le rôle relatif du climat augmente à mesure que le réchauffement se poursuit, mais dans certains paysages, son importance peut être dépassée par d'autres facteurs de changement global.

L'activité humaine intervient directement dans les incendies des deux derniers siècles. Les effets anthropiques (changements régionaux dans l'utilisation des terres, les départs de feu ou la suppression) peuvent annuler et dépasser les effets du climat sur les incendies. Cependant, le climat futur peut jouer un rôle plus important dans l'évolution globale des incendies, surpassant l'influence anthropique directe sur les incendies.

Les premières tentatives de modélisation des incendies d'origine humaine étaient basées sur des évaluations indirectes de l'activité humaine à l'aide d'indicateurs démographiques ou de données sur l'accessibilité générique aux zones forestières. Par la suite, plusieurs analyses spatiales de la fréquence des incendies ont exploré le rôle de facteurs spatialement explicites tels que la distance aux routes, l'emplacement des zones de loisirs ou la distance aux agglomérations urbaines.

Des analyses statistiques explorent les relations climat-homme-feu, avec des méthodes plus ou moins avancées (régression linéaire, apprentissage automatique, indicateurs climat composés). La relation climat-feu, à l'échelle

globale, est considérée comme peu influencée par les actions directes humaines, donc utilisable pour la projection future des incendies avec la projection du climat.

Une catégorie particulière d'études travaille sur l'attribution des événements extrêmes aux changements climatiques anthropiques. FWI (issue des conditions météo) représente le danger des feux. En utilisant une valeur de seuil correspondant à un percentile élevé de FWI, on peut définir les événements extrêmes. On évalue la probabilité de l'événement dans le monde factuel (influencé par le changement climatique) et celle dans le monde contrefactuel (sans changement climatique) pour déduire la FAR — *Fraction of attributed risk* (notion très utilisée dans le monde de l'assurance).

6. Liste des références du chapitre V

Abatzoglou, John T., Crystal A. Kolden, A. Park Williams, James A. Lutz, et Alistair M. S. Smith. 2017. « Climatic influences on interannual variability in regional burn severity across western US forests ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf16165.

Abatzoglou, John T., et A. Park Williams. 2016. « Impact of Anthropogenic Climate Change on Wildfire across Western US Forests ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(42) : 11770-75. doi : 10.1073/pnas.1607171113.

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.

Abram, Nerilie J., Benjamin J. Henley, Alex Sen Gupta, Tanya Lippmann, Hamish Clarke, Andrew J. Dowdy, Jason J. Sharples, Michael Battaglia, Rachael H. Nolan, Tianran Zhang, Martin J. Wooster, J. B. Wurtzel, Katrin J. Meißner, Andrew J. Pitman, Anna M. Ukkola, Brett P. Murphy, Nigel J. Tapper, et Matthias M. Boer. 2021. « Connections of climate change and variability to large and extreme forest fires in southeast Australia ». *Communications Earth & Environ-ment*. doi : 10.1038/s43247-020-00065-8.

Archibald, Sally, Caroline E. R. Lehmann, José Gómez-Dans, et Ross A. Bradstock. 2013. « Defining pyromes and global syndromes of fire regimes ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. doi : 10.1073/pnas.1211466110.

Barbero, Renaud, John T. Abatzoglou, François Pimont, Julien Ruffault, et Thomas Curt. 2020. « Attributing Increases in Fire Weather to Anthropogenic Climate Change Over France ». *Frontiers in Earth Science*. doi : 10.3389/feart.2020.00104.

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.

Boer, Matthias M., Rachael H. Nolan, Víctor Resco de Dios, Hamish Clarke, Owen Price, et Ross A. Bradstock. 2017. « Changing Weather Extremes Call for Early Warning of Potential for Catastrophic Fire ». *Earth's Future*. doi : 10.1002/2017ef000657.

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.

Bradstock, Ross A. 2010. « A biogeographic model of fire regimes in Australia: current and future implications ». *Global Ecology and Biogeography*. doi : 10.1111/j.1466-8238.2009.00512.x.

Calheiros, Tomás, João P. Nunes, et Mário G. Pereira. 2020. « Recent evolution of spatial and temporal patterns of burnt areas and fire weather risk in the Iberian Peninsula ». *Agricultural and Forest Meteorology*. doi : 10.1016/j.agrformet.2020.107923.

Calheiros, Tomás, Mário G. Pereira, et João Pedro Nunes. 2020. « Assessing impacts of future climate change on extreme fire weather and pyro-regions in Iberian Peninsula ». *Science of The Total Environment*. doi : 10.1016/j.scitotenv.2020.142233.

Chen, Bin, Yufang Jin, Erica Scaduto, Max A. Moritz, Michael L. Goulden, et James T. Randerson. 2021. « Climate, Fuel, and Land Use Shaped the Spatial Pattern of Wildfire in California's Sierra Nevada ». *Journal of Geophysical Research*. doi : 10.1029/2020jg005786.

Chuvieco, Emilio, Joshua Lizundia-Loiola, Maria Lucrecia Pettinari, Rubén Ramo, Marc Padilla, Kevin Tansey, Florent Mouillot, Pierre Laurent, Thomas Storm, Angelika Heil, et S. Plummer. 2018. « Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250 m reflectance bands and thermal anomalies ». *Earth System Science Data*. doi : 10.5194/essd-10-2015-2018.

Clarke, Hamish, Andrew J. Pitman, Jatin Kala, Claire Carouge, Vanessa Haverd, et Jason P. Evans. 2016. « An investigation of future fuel load and fire weather in Australia ». *Climatic Change*. doi : 10.1007/s10584-016-1808-9.

Cueva, Antonio Vázquez de la, José R. Quintana, et Isabel Cañellas. 2012. « Fire activity projections in the SRES A2 and B2 climatic scenarios in peninsular Spain ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf11013.

Cunningham, Calum X., Grant J. Williamson, et David M. J. S. Bowman. 2024. « Increasing Frequency and Intensity of the Most Extreme Wildfires on Earth ». *Nature Ecology & Evolution* 8(8) : 1420-25. doi : 10.1038/s41559-024-02452-2.

Curt, Thomas, et Thibaut Frejaville. 2018. « Wildfire Policy in Mediterranean France: How Far Is It Efficient and Sustainable? » *Risk Analysis* 38(3) : 472-88. doi : 10.1111/risa.12855.

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.

Dong, Chunyu, A. Park Williams, John T. Abatzoglou, Kairong Lin, Gregory S. Okin, Thomas W. Gillespie, Di Long, Yen-Heng Lin, Alex Hall, et Glen M. MacDonald. 2022. « The Season for Large Fires in Southern California Is Projected to Lengthen in a Changing Climate ». *Communications Earth & Environment* 3(1) : 22. doi : 10.1038/s43247-022-00344-6.

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.

Dupuy, Jean-luc, Hélène Fargeon, Nicolas Martin-StPaul, François Pimont, Julien Ruffault, Mercedes Guijarro, Carmen Hernando, Javier Madrigal, et Paulo Fernandes. 2020. « Climate Change Impact on Future Wildfire Danger and Activity in Southern Europe: A Review ». *Annals of Forest Science* 77(2) : 35. doi : 10.1007/s13595-020-00933-5.

El Garroussi, Siham, Francesca Di Giuseppe, Christopher Barnard, et Fredrik Wetterhall. 2024. « Europe Faces up to Tenfold Increase in Extreme Fires in a Warming Climate ». *Npj Climate and Atmospheric Science* 7(1) : 30. doi : 10.1038/s41612-024-00575-8.

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.

Feng, Sifang, Jakob Zscheischler, Zengchao Hao, et Emanuele Bevacqua. 2025. « Growing Human-Induced Climate Change Fingerprint in Regional Weekly Fire Extremes ». *Npj Climate and Atmospheric Science* 8(1) : 152. doi : 10.1038/s41612-025-01021-z.

Forkel, Matthias, Niels Andela, Sandy P. Harrison, Gitta Lasslop, Margreet J. E. van Marle, Emilio Chuvieco, Wouter Dorigo, Matthew S. Forrest, Stijn Hantson, Angelika Heil, Li Fang, Joe R. Melton, Stephen Sitch, Chao Ye, et Almut Arneth. 2019. « Emergent relationships with respect to burned area in global satellite observations and fire-enabled vegetation models ». *Biogeosciences*. doi : 10.519 4/bg— 16-57-2019.

Fréjaville, Thibaut, et Thomas Curt. 2015. « Spatiotemporal patterns of changes in fire regime and climate: defining the pyroclimates of south-eastern France (Mediterranean Basin) ». *Climatic Change*. doi : 10.1007/s10584-015-1332-3.

Fréjaville, Thibaut, et Thomas Curt. 2017. « Seasonal changes in the human alteration of fire regimes beyond the climate forcing ». *Environmental Research Letters*. doi : 10.1088/1748-9326/aa5d23.

Gan, Jianbang. 2025. « Disentangling the Drivers of Wildfires ». *Science* 387(6729):22-23. doi : 10.1126/science.adu5463.

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, 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.

Gerberding, Kilian, et Uta Schirpke. 2025. « Mapping the Probability of Forest Fire Hazard across the European Alps under Climate Change Scenarios ». *Journal of Environmental Management* 377:124600- 124600. doi : 10.1016/j.jenvman.2025.124600.

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.

Good, Peter, Marco Moriondo, Christos Giannakopoulos, et Marcello Bindi. 2008. « The meteorological conditions associated with extreme fire risk in Italy and Greece: relevance to climate model studies ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf07001.

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.

Gouveia, Célia M., Ioannis Bistinas, Margarida L. R. Liberato, Ana Bastos, Nikos Koutsias, et Ricardo M. Trigo. 2016. « The outstanding synergy between drought, heatwaves and fuel on the 2007 Southern Greece exceptional fire season ». *Agricultural and Forest Meteorology*. doi : 10.1016/j.agrformet.2015.11.023.

Haas, Olivia, Theodore Keeping, José Gomez-Dans, I. Colin Prentice, et Sandy P. Harrison. 2024. « The global drivers of wildfire ». *Frontiers in Environmental Science* 12:1438262. doi : 10.3389/fenvs.2024.1438262.

Hantson, Stijn, Douglas I. Kelley, Almut Arneth, Sandy P. Harrison, Sally Archibald, Dominique Bachelet, Matthew S. Forrest, Thomas Hickler, Gitta Lasslop, Fang Li, Stéphane Mangeon, Joe R. Melton, Lars Nieradzik, Sam Rabin, Iain Colin Prentice, Tim Sheehan, Stephen Sitch, Lina Teckentrup, Apostolos Voulgarakis, et Chao Yue. 2020. « Quantitative assessment of fire and vegetation properties in simulations with fire-enabled vegetation models from the Fire Model Intercomparison Project ». *Geoscientific Model Development Discussions*. doi : 10.5194/gmd-2019-261.

Harris, Rebecca M. B., Robert M. Harris, Tomas A. Remenyi, Grant J. Williamson, Nathaniel L. Bindoff, et David M. J. S. Bowman. 2016. « Climate—vegetation—fire interactions and feedbacks: trivial detail or major barrier to projecting the future of the Earth system? » *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. doi : 10.1002/wcc.428.

Harrison, Sandy P., Olivia Haas, Patrick J. Bartlein, Luke Sweeney, et Guoxi Zhang. 2025. « Climate, Vegetation, People: Disentangling the Controls of Fire at Different Timescales ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 380(1924) : 20230464. doi : 10.1098/rstb.2023.0464.

Harrison, Sandy P., Iain Colin Prentice, Keith J. Bloomfield, Ning Dong, Matthias Forkel, Matthew Forrest, Ramesh K. Ningthoujam, Adam F. A. Pellegrini, Yicheng Shen, Mara Baudena, Annabelle W. Cardoso, Jessica C. Huss, Jaideep Joshi, Imma Oliveras, Juli G. Pausas, et Kimberley J. Simpson. 2021. « Understanding and modelling wildfire regimes: an ecological perspective ». *Environmental Research Letters*. doi : 10.1088/1748-9326/ac39be.

Hawkins, Linnia, John T. Abatzoglou, Sihan Li, et David E. Rupp. 2022. « Anthropogenic influence on recent severe autumn fire weather in the west coast of the United States ». *Geophysical Research Letters*. doi : 10.1029/2021gl095496.

Hessl, Amy E. 2011. « Pathways for climate change effects on fire: Models, data, and uncertainties »: *Progress in Physical Geography*. doi : 10.1177/0309133311407654.

Heyerdahl, Emily K., Linda B. Brubaker, et James K. Agee. 2001. « SPATIAL CONTROLS OF HISTORICAL FIRE REGIMES: A MULTISCALE EXAMPLE FROM THE INTERIOR WEST, USA ». *Ecology*. doi : 10.1890/0012-9658(2001)082%5B0660:scohfr%5D2.0.co;2.

Higuera, Philip E., Bryan N. Shuman, Kyra D. Wolf, et Kyra D. Wolf. 2021. « Rocky Mountain subalpine forests now burning more than any time in recent millennia. » *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. doi : 10.1073/pnas.2103135118.

Huang, Yaoxian, Shi-Liang Wu, et Jed O. Kaplan. 2015. « Sensitivity of global wildfire occurrences to various factors in the context of global change ». *Atmospheric Environment*. doi : 10.1016/j.atmosenv.2015.06.002.

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.

Jain, Piyush, Quinn E. Barber, Stephen Taylor, Ellen Whitman, Dante Castellanos Acuna, Yan Boulanger, Raphaël D. Chavardès, Jack Chen, Peter Englefield, Mike Flannigan, Martin P. Girardin, Chelene C. Hanes, John M. Little, Kimberly Morrison, Rob Skakun, Dan K. Thompson, Xianli Wang, et Marc-André Parisien. 2024. « Drivers and Impacts of the Record-Breaking 2023 Wildfire Season in Canada ». *Nature Communications* 15(1) : 6764. doi : 10.1038/s41467-024-51154-7.

Jain, Piyush, Mari R. Tye, Debasish PaiMazumder, et Mike D. Flannigan. 2020. « Downscaling fire weather extremes from historical and projected climate models ». *Climatic Change*. doi : 10.1007/s10584-020-02865-5.

Jolly, W. Matt, Mark A. Cochrane, Patrick H. Freeborn, Zachary A. Holden, Timothy J. Brown, Grant J. Williamson, et David M. J. S. Bowman. 2015. « Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 ». *Nature Communications*. doi : 10.1038/ncomms8537.

Jones, Matthew W., John T. Abatzoglou, Sander Veraverbeke, Niels Andela, Gitta Lasslop, Matthias Forkel, Adam J. P. Smith, Chantelle Burton, Richard A. Betts, Guido R. Van Der Werf, Stephen Sitch, Josep G. Canadell, Cristina Santín, Crystal Kolden, Stefan H. Doerr, et Corinne Le Quéré. 2022. « Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change ». *Reviews of Geophysics* 60(3) : e2020RG000726. doi : 10.1029/2020RG000726.

Joshi, Jaideep, et Raman Sukumar. 2021. « Improving prediction and assessment of global fires using multilayer neural networks ». *Scientific Reports*. doi : 10,103 8/s 41598-021-81233-4.

Karali, Anna, Maria Hatzaki, Christos Giannakopoulos, A. Roussos, Gavriil Xanthopoulos, et Vasileios Tenentes. 2013. « Sensitivity and evaluation of current fire risk and future projections due to climate change: the case study of Greece ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-14-143-2014.

Kelly, Luke T., Michael-Shawn Fletcher, Imma Oliveras Menor, Adam F. A. Pellegrini, Ella Plumanns-Pouton, Pere Pons, Grant J. Williamson, et David M. J. S. Bowman. 2023. « Understanding Fire Regimes for a Better Anthropocene ». *Annual Review of Environment and Resources* 48(1) : 207-35. doi : 10.1146/annurev-environ-120220-055357.

Kirchmeier-Young, M. C., N. P. Gillett, F. W. Zwiers, A. J. Cannon, et F. S. Anslow. 2019. « Attribution of the Influence of Human-Induced Climate Change on an Extreme Fire Season ». *Earth's Future* 7(1) : 2-10. doi : 10.1029/2018EF001050.

Kirchmeier-Young, Megan C., Elizaveta Malinina, Quinn E. Barber, Karen Garcia Perdomo, Salvatore R. Curasi, Yongxiao Liang, Piyush Jain, Nathan P. Gillett, Marc-André Parisien, Alex J. Cannon, Aranildo R. Lima, Vivek K. Arora, Yan Boulanger, Joe R. Melton, Laura Van Vliet, et Xuebin Zhang. 2024. « Human Driven Climate Change Increased the Likelihood of the 2023 Record Area Burned in Canada ». *Npj Climate and Atmospheric Science* 7(1) : 316. doi : 10.1038/s41612-024-00841-9.

Kitzberger, Thomas, Peter M. Brown, Emily K. Heyerdahl, Thomas W. Swetnam, et Thomas T. Veblen. 2007. « Contingent Pacific-Atlantic Ocean influence on multicentury wildfire synchrony over western North America. » *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. doi : 10.1073/pnas.0606078104.

Kloster, Silvia, Natalie M. Mahowald, James T. Randerson, David M. Lawrence, et Peter J. Lawrence. 2011. « The impacts of climate, land use, and demography on fires during the 21st century simulated by CLM-CN ». *Biogeosciences*. doi : 10,519 4/bg— 9-509-2012.

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.

Koutsias, Nikos, Gavriil Xanthopoulos, Dimitra Founda, Fotios Xystrakis, Foula Nioti, Magdalini Pleniou, Giorgos Mallinis, et Margarita Arianoutsou. 2013. « On the Relationships between Forest Fires and Weather Conditions in Greece from Long-Term National Observations (1894—2010) ». *International Journal of Wildland Fire* 22(4) : 493. doi : 10.1071/WF12003.

Krikken, Folmer, Flavio Lehner, Karsten Haustein, Igor Drobyshev, et Geert Jan Van Oldenborgh. 2021. « Attribution of the Role of Climate Change in the Forest Fires in Sweden 2018 ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21(7):2169-79. doi : 10.5194/nhess-21-2169-2021.

Kumar, Mukesh, Amir AghaKouchak, John T. Abatzoglou, et Mojtaba Sadegh. 2025. « Compounding Effects of Climate Change and WUI Expansion Quadruple the Likelihood of Extreme-Impact Wildfires in California ». *Npj Natural Hazards* 2(1) : 17. doi : 10.1038/s44304-025-00067-6.

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.

Lanet, Marine. 2025. « Substantial increase in wildfire risk projected under anthropogenic climate change in Southwest France ». *Npj Natural Hasards (in revision)*. doi : 10.1038/s44304-025-00124-0.

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.

Liu, Zhi Hua, et Michael C. Wimberly. 2016. « Direct and indirect effects of climate change on projected future fire regimes in the western United States ». *Science of The Total Environment*. doi : 10.1016/j.scitotenv.2015.10.093.

Liu, Zhi Hua, Michael C. Wimberly, Aashis Lamsal, Terry L. Sohl, et Todd J. Hawbaker. 2015. « Climate change and wildfire risk in an expanding wildland—urban interface: a case study from the Colorado Front Range Corridor ». *Landscape Ecology*. doi : 10.1007/s10980-015-0222-4.

Loehman, Rachel A., Robert E. Keane, et Lisa M. Holsinger. 2020. « Simulation modeling of complex climate, wildfire, and vegetation dynamics to address wicked problems in land management ». *Frontiers in Forests and Global Change*. doi : 10.3389/ffgc.2020.00003.

Macias-Fauria, Marc, Sean T. Michaletz, et Edward A. Johnson. 2011. « Predicting climate change effects on wildfires requires linking processes across scales ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. doi : 10.1002/wcc.92.

Matthews, Stuart, Andrew L. Sullivan, Penny J. Watson, et Richard J. Williams. 2012. « Climate change, fuel and fire behaviour in a eucalypt forest. » *Global Change Biology*. doi : 10,111 1/j.1365-2486.2012.02768.x.

McElhinny, Megan, Justin F. Beckers, Chelene C. Hanes, Mike D. Flannigan, et Piyush Jain. 2020. « A high-resolution reanalysis of global fire weather from 1979 to 2018 — overwintering the Drought Code ». *Earth System Science Data Discussions*. doi : 10.5194/essd-2019-248.

McKenzie, Donald, et Jeremy S. Littell. 2017. « Climate change and the eco-hydrology of fire: Will area burned increase in a warming western USA? » *Ecological Applications*. doi : 10.1002/eap.1420.

Miller, Julia, Andrea Böhnisch, Ralf Ludwig, et Manuela I. Brunner. 2023. « Climate Change Impacts on Regional Fire Weather in Heterogeneous Landscapes of Central Europe ». *Natural Hazards and Earth System*. doi : 10.5194/nhess-2023-51.

Moriondo, Marco, Peter Good, Rita Durão, Marco Bindi, Christos Giannakopoulos, et João Corte-Real. 2006. « Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area ». *Climate Research*. doi : 10.3354/cr031085.

Mouillot, Florent, Serge Rambal, et Richard Joffre. 2002. « Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem ». *Global Change Biology*. doi : 10.1046/j.1365-2486.2002.00494.x.

Page, Yannick Le, Duarte Oom, João M. N. Silva, Per Jönsson, et José M. C. Pereira. 2010. « Seasonality of vegetation fires as modified by human action: observing the deviation from eco-climatic fire regimes ». *Global Ecology and Biogeography*. doi : 10,111 1/j.1466-8238.2010.00525.x.

Parente, Joana, Marj Tonini, Zoi Stamou, Nikos Koutsias, et Mário Pereira. 2023. « Quantitative Assessment of the Relationship between Land Use/Land Cover Changes and Wildfires in Southern Europe ». *Fire* 6(5) : 198-198. doi : 10.3390/fire6050198.

Parks, Sean A., et John T. Abatzoglou. 2020. « Warmer and Drier Fire Seasons Contribute to Increases in Area Burned at High Severity in Western US Forests From 1985 to 2017 ». *Geophysical Research Letters*. doi : 10.1029/2020gl089858.

Pausas, Juli G. 2004. « CHANGES IN FIRE AND CLIMATE IN THE EASTERN IBERIAN PENINSULA (MEDITERRANEAN BASIN) ». *Climatic Change*. doi : 10,102 3/b : clim.0000018508.94901.9c.

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. 2021. « Wildfires and global change ». *Frontiers in Ecology and the Environment*. doi : 10.1002/fee.2359.

Pausas, Juli G., et Susana Paula. 2012. « Fuel shapes the fire—climate relationship: evidence from Mediterranean ecosystems ». *Global Ecology and Biogeography*. doi : 10.1111/j.1466-8238.2012.00769.x.

Pechony, Olga, et Drew T. Shindell. 2010. « Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. doi : 10.1073/pnas.1003669107.

Peñuelas, Josep, Josep G. Canadell, C. P. Mick Meyer, Garry D. Cook, Andrew J. Dowdy, Peter R. Briggs, Jürgen Knauer, Acacia S. Pepler, et Vanessa Haverd. 2021. « Multi-decadal increase of forest burned area in Australia is linked to climate change ». *Nature Communications*. doi : 10.1038/s41467-021-27225-4.

Piñol, Josep, Jaume Terradas, et Francisco Lloret. 1998. « Climate Warming, Wildfire Hazard, and Wildfire Occurence in Coastal Eastern Spain ». *Climatic Change*. doi : 10.1023/a:1005316632105.

Pitman, Andrew J., Gemma Narisma, et John McAneney. 2007. « The impact of climate change on the risk of forest and grassland fires in Australia ». *Climatic Change*. doi : 10.1007/s10584-007-9243-6.

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.

Rodrígues, Marcos, Dhais Peña-Angulo, Ana Russo, María Zúñiga Antón, et Adrián Cardíl. 2021. « Do climate teleconnections modulate wildfire-prone conditions over the Iberian Peninsula? » *Environmental Research Letters*. doi : 10.1088/1748-9326/abe25d.

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, Vincent Moron, Ricardo M. Trigo, Florent Mouillot, Nikos Koutsias, François Pimont, Nicolas Martin-StPaul, Renaud Barbero, Jean-Luc Dupuy, Ana Russo, et Chiraz Belhadj-Khedher. 2020. « Increased Likelihood of Heat-Induced Large Wildfires in the Mediterranean Basin ». *Scientific Reports* 10(1) : 13790. doi : 10.1038/s41598-020-70069-z.

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.

Salis, Michele, Liliana Del Giudice, Roghayeh Jahdi, Fermín J. Alcasena, Carla Scarpa, Grazia Pellizzaro, Valentina Bacciu, Matilde Schirru, Andrea Ventura, Marcello Casula, Fabrizio Pedes, Annalisa Canu, Pierpaolo Duce, et Bachisio Arca. 2022. « Spatial Patterns and Intensity of Land Abandonment Drive Wildfire Hazard and Likelihood in Mediterranean Agropastoral Areas ». *Land*. doi : 10.3390/land11111942.

Senande-Rivera, Martín, Damián Insua-Costa, et Gonzalo Miguez-Macho. 2022. « Spatial and Temporal Expansion of Global Wildland Fire Activity in Response to Climate Change ». *Nature Communications* 13(1) : 1208. doi : 10.1038/s41467-022-28835-2.

Shi, Long, Jinhui Wang, Guohui Li, Michael Yit Lin Chew, Heping Zhang, Guomin Zhang, et Bogdan Z. Dlugogorski. 2025. « Increasing Fire Risks in Cities Worldwide under Warming Climate ». *Nature Cities* 2(3) : 254-64. doi : 10.1038/s44284-025-00204-2.

Sibold, Jason S., et Thomas T. Veblen. 2006. « Relationships of subalpine forest fires in the Colorado Front Range with interannual and multidecadal-scale climatic variation ». *Journal of Biogeography*. doi : 10.1111/j.1365-2699.2006.01456.x.

Su, Hongxuan, Yan Yu, Weidong Guo, et Jiafu Mao. 2025. « Convective Potential and Fuel Availability Complement Near-Surface Weather in Regulating Global Wildfire Activity ». *Science Advances* 11(8) : eadp 7765. doi : 10.1126/sciadv.adp7765.

Swain, Daniel L., Andreas F. Prein, John T. Abatzoglou, Christine M. Albano, Manuela Brunner, Noah S. Diffenbaugh, Deepti Singh, Christopher B. Skinner, et Danielle Touma. 2025. « Hydroclimate Volatility on a Warming Earth ». *Nature Reviews Earth & Environment* 6(1) : 35-50. doi : 10.1038/s43017-024-00624-z.

Syphard, Alexandra D., Jon E. Keeley, Anne Hopkins Pfaff, et Ken Ferschweiler. 2017. « Human presence diminishes the importance of climate in driving fire activity across the United States ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. doi : 10.1073/pnas.1713885114.

Syphard, Alexandra D., Avi Bar Massada, Van Butsic, et Jon E. Keeley. 2013. « Land Use Planning and Wildfire: Development Policies Influence Future Probability of Housing Loss ». *PLOS ONE*. doi : 10.1371/journal.pone.0071708.

Syphard, Alexandra D., Heather Rustigian-Romsos, Michael Mann, Erin Conlisk, Max A. Moritz, et David Ackerly. 2019. « The Relative Influence of Climate and Housing Development on Current and Projected Future Fire Patterns and Structure Loss across Three California Landscapes ». *Global Environmental Change* 56:41-55. doi : 10.1016/j.gloenvcha.2019.03.007.

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.

Teckentrup, Lina, Sandy P. Harrison, Stijn Hantson, Angelika Heil, Joe R. Melton, Matthew S. Forrest, Fang Li, Chao Yue, Almut Arneth, Thomas Hickler, Stephen Sitch, et Gitta Lasslop. 2019. « Response of simulated

burned area to historical changes in environmental and anthropogenic factors: a comparison of seven fire models ». *Biogeosciences*. doi : 10.5194/bg-16-3883-2019.

Teixeira, José A., Joao C. Teixiera, Gerd A. Folberth, Fiona M. O'Connor, Nadine Unger, et Apostolos Voulgarakis. 2021. « Coupling interactive fire with atmospheric composition and climate in the UK Earth System Model ». *2021*. doi : 10.5194/gmd-14-6515-2021.

Torres-Vázquez, Miguel Ángel, Sixto Herrera, Andrina Gincheva, Amar Halifa-Marín, Leone Cavicchia, Francesca Di Giuseppe, Juan Pedro Montávez, et Marco Turco. 2025. « Enhancing Seasonal Fire Predictions with Hybrid Dynamical and Random Forest Models ». *Npj Natural Hazards* 2(1) : 20. doi : 10.1038/s44304-025-00069-4.

Trigo, Ricardo M., Pedro M. Sousa, Mário G. Pereira, Domingo Fernando Rasilla Álvarez, et Célia M. Gouveia. 2016. « Modelling wildfire activity in Iberia with different atmospheric circulation weather types ». *International Journal of Climatology*. doi : 10.1002/joc.3749.

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, Jost von Hardenberg, et Antonello Provenzale. 2014. « Climate change impacts on wildfires in a Mediterranean environment ». *Climatic Change*. doi : 10.1007/s10584-014-1183-3.

Turco, Marco, Juan José Rosa-Cánovas, Joaquín Bedia, Sonia Jerez, Juan Pedro Montávez, Maria Carmen Llasat, et Antonello Provenzale. 2018. « Exacerbated Fires in Mediterranean Europe Due to Anthropogenic Warming Projected with Non-Stationary Climate-Fire Models ». *Nature Communications* 9(1) : 3821. doi : 10.1038/s41467-018-06358-z.

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.

Viegas, D. Xavier, Giovanni Bovio, Almerindo Ferreira, Antonio Nosenzo, et Bernard Sol. 1999. « Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf00015.

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.

Vitolo, Claudia, Francesca Di Giuseppe, Blazej Krzeminski, et Jesús San-Miguel-Ayanz. 2019. « A 1980— 2018 global fire danger re-analysis dataset for the Canadian Fire Weather Indices ». *Scientific Data*. doi : 10.1038/sdata.2019.32.

Wanders, Niko, Geert Jan van Oldenborgh, Folmer Krikken, Sophie C. Lewis, Nicholas J. Leach, Flavio Lehner, Kate R. Saunders, Michiel van Weele, Karsten Haustein, Sihan Li, David Wallom, Sarah R. Supp, Julie Arrighi, Roop P. Singh, Maarten van Aalst, Sjoukje Philip, Robert Vautard, et Friederike E. L. Otto. 2020. « Attribution of the Australian bushfire risk to anthropogenic climate change ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-2020-69.

Wang, Weiwei, Xianli Wang, Mike D. Flannigan, Luc Guindon, Tom Swystun, Dante Castellanos-Acuna, Wanli Wu, et Guangyu Wang. 2025. « Canadian Forests Are More Conducive to High-Severity Fires in Recent Decades ». *Science* 387(6729) : 91-97. doi : 10.1126/science.ado1006.

Werf, Guido R. van der, James T. Randerson, Louis Giglio, Nadine Gobron, et A. J. Dolman. 2008. « Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics ». *Global Biogeochemical Cycles*. doi : 10.1029/2007gb003122.

Westerling, Anthony L., Alexander Gershunov, Timothy J. Brown, Daniel R. Cayan, et Michael D. Dettinger. 2003. « CLIMATE AND WILDFIRE IN THE WESTERN UNITED STATES ». *Bulletin of the American Meteorological Society*. doi : 10.1175/bams-84-5-595.

Westerling, Anthony L., Hugo G. Hidalgo, Daniel R. Cayan, et Thomas W. Swetnam. 2006. « Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity ». *Science*. doi : 10.1126/science.1128834.

Whitlock, Cathy, Jennifer R. Marlon, Christy E. Briles, Andrea Brunelle, Colin J. Long, et Patrick J. Bartlein. 2008. « Long-term relations among fire, fuel, and climate in the north-western US based on lake-sediment studies ». *International Journal of Wildland Fire*. doi : 10.1071/wf07025.

Williams, A. Park, et John T. Abatzoglou. 2016. « Recent advances and remaining uncertainties in resolving past and future climate effects on global fire activity ». *Current Climate Change Reports*. doi : 10.1007/s40641-016-0031-0.

Williams, A. Park, John T. Abatzoglou, Alexander Gershunov, Janin Guzmán-Morales, Daniel A. Bishop, Jennifer K. Balch, et Dennis P. Lettenmaier. 2019. « Observed Impacts of Anthropogenic Climate Change on Wildfire in California ». *Earth's Future*. doi : 10.1029/2019ef001210.

Yang, Wei, Marie Gardelin, Jonas Olsson, et Thomas Bosshard. 2015. « Multi-variable bias correction : application of forest fire risk in present and future climate in Sweden ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi : 10.5194/nhess-15-2037-2015.

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.