



HAL
open science

Projections des effets du changement climatique sur l'activité des feux de forêt au 21ème siècle : Rapport final

François Pimont, Jean-Luc Dupuy, Julien Ruffault, Eric Rigolot, Thomas Opitz,
Juliette Legrand, Renaud Barbero

► **To cite this version:**

François Pimont, Jean-Luc Dupuy, Julien Ruffault, Eric Rigolot, Thomas Opitz, et al.. Projections des effets du changement climatique sur l'activité des feux de forêt au 21ème siècle : Rapport final. INRAE. 2023. <hal-04149936>

HAL Id: hal-04149936

<https://hal.inrae.fr/hal-04149936v1>

Submitted on 16 Nov 2023

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

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



HAL Authorization



**Projections des effets du changement
climatique sur l'activité des feux de forêt
au 21ème siècle :
Rapport final
(31 mai 2023)**

**François Pimont¹, Jean-Luc Dupuy¹, Julien Ruffault¹, Eric Rigolot¹,
Thomas Opitz², Juliette Legrand², Renaud Barbero³**

¹ INRAE URFM, Avignon

² INRAE BIOSP, Avignon

³ INRAE RECOVER, Aix-en-Provence

Contribution technique à la mission d'expertise conjointe sur l'extension des zones à risque d'incendie de forêt et de végétation à échéance du milieu et fin du siècle dans le contexte du changement climatique

Rapport réalisé dans le cadre de la convention MAA-INRAE du 9 mai 2022,
n°G 03 / 2022

<u>Sommaire</u>	p 2
Résumé	p 3
1. Introduction	p 6
2. Présentation succincte de la méthode pour les deux zones	p 10
2.1. Projections d'Indices Feu-Météo (IFM) pour la période 2001-2100	p 10
2.2. Projections d'activité de feu par l'approche Firelihood	p 12
2.3. Compatibilité des jeux de données climatiques INRAE et DRIAS 2020	p 14
2.4. Horizons, scénarios, degrés de réchauffement global et TRACC	p 17
3. Projections en zone Sud-Est (zone Prométhée)	p 20
3.1. Projections pour l'ensemble de la zone Sud-Est	p 20
3.2. La zone à risque Sud-Est : expansion future et intensification	p 25
3.3. Allongement et intensification de la saison estivale de feu	p 31
3.4. Impact sur la végétation	p 34
3.5. Impact sur les dispositifs de prévention et de lutte	p 37
3.6. Synthèse des analyses en zone Sud-Est	p 39
4. Projections en zone Sud-Ouest (4 départements de la zone ATGeRi)	p 41
4.1. Projections pour l'ensemble de la zone Sud-Ouest	p 41
4.2. La zone à risque Sud-Ouest : expansion future et intensification	p 49
4.3. Allongement et intensification des saisons de feu (printemps, été)	p 56
4.4. Impact sur les dispositifs de prévention et de lutte	p 60
4.5. Synthèse des analyses en zone Sud-Ouest	p 62
5. Discussion des résultats portant sur les deux zones	p 64
5.1. Limites et incertitudes	p 64
5.2. Comparaison entre les zones Sud-Est et Sud-Ouest	p 68
5.3. Préconisations pour de futures actualisations	p 69
6. Étude complémentaire « France entière » sur les feux > 20 ha	p 71
6.1. Présentation succincte de la méthodologie	p 71
6.2. Projections de l'évolution des feux > 20 ha	p 77
6.3. Synthèse des analyses « France entière »	p 84
Remerciements	p 86
Références	p 87
Annexes	p 90

Résumé

Le changement climatique induit une augmentation du danger météorologique d'incendie de forêt en France, et en particulier de l'Indice Feu Météo (IFM) qui peut être calculé chaque jour sur une grille de 8-km. Les projections climatiques issues des différents modèles météorologiques permettent d'anticiper l'évolution de cet indice selon différents scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5), différents horizons temporels (2050, 2090) et différents niveaux de réchauffement global (ex. +1.5°C, +2°C, +3°C, +4°C). Grâce à une approche de modélisation probabiliste appelé *Firelihood*, modèle ajusté sur les observations des feux passés, nous traduisons ici ces projections d'IFM en activités de feu potentielles futures (en nombre de feux par classe de tailles et surfaces brûlées).

Les travaux portent sur les deux régions françaises les plus sensibles aux incendies de forêt : les quinze départements de la zone Sud-Est (zone dite « Prométhée ») et quatre départements de l'ex-région Aquitaine¹, que nous appellerons ici zone « Sud-Ouest ». On notera bien que ces deux zones ne correspondent aucunement aux « zones de défense et de sécurité », définies pour l'organisation de la sécurité nationale et de la défense civile et économique. En zone Sud-Est, seul le cas des feux dit estivaux élargis a été abordé (période du 28 mai au 5 novembre), alors que l'ensemble de l'année a été traitée en zone Sud-Ouest, y compris les feux de printemps. Une partie complémentaire de projection sur l'ensemble du territoire national a également été réalisée, mais elle porte uniquement sur le nombre de feux de plus de 20 ha, à partir d'un modèle simplifié.

En ce qui concerne les activités des feux futurs, une attention particulière est portée à certaines métriques clés comme le nombre de feux « qui échappent » (supérieur à 1 ha), le nombre de feux que l'on qualifiera de « significatifs » (supérieur à 20 ha), le nombre de grands feux (supérieur à 100 ha) et les surfaces brûlées. Afin de quantifier les effets futurs du changement climatique, nous comparons les activités de feux projetées par *Firelihood* pour les horizons 2050 (2041-2060) et 2090 (2080-2099) avec celles simulées par le modèle pour une période de référence climatique (2001-2020).

Les projections d'activité sur les deux zones montrent des effets très forts du changement climatique. **Deux synthèses d'une page et demie concernant l'évolution des activités de chaque zone sont présentées aux sections 3.6 et 4.5 du présent rapport.** On s'y référera donc pour plus d'information concernant les différents scénarios et horizons temporels. En bref, les augmentations des différentes métriques de l'activité moyenne des feux atteignent par exemple +226% pour les feux > 100 ha en zone Sud-Est et +161% pour les surfaces brûlées en zone Sud-Ouest en 2090 selon RCP 8.5. On notera cependant que l'augmentation est déjà bien amorcée, puisque les surfaces brûlées moyennes augmentent dès 2030 de 20 à 28% selon les scénarios et la zone, par rapport à la période historique. L'évolution des métriques à un niveau de retour « décennal » et « extrême » est également analysée, les surfaces brûlées des années extrêmes correspondant par exemple à entre trois et cinq fois la moyenne annuelle selon qu'on se trouve en zone Sud-Est ou Sud-Ouest, respectivement. Par ailleurs, les différences entre RCP 4.5 et 8.5 à partir du milieu du siècle soulignent l'importance de la mise en œuvre des scénarios de réduction d'émissions au niveau global, les impacts augmentant de manière exponentielle avec les degrés de réchauffement.

¹ Gironde, Landes, Dordogne et Lot-et Garonne

Les deux zones devraient voir une expansion importante de leur zone à risque, passant respectivement de 27 à 64% et de 24 à 49% de ces territoires en RCP 8.5 en 2090 en zone Sud-Est et Sud-Ouest, respectivement. Les nouveaux territoires concernés par cette expansion seraient essentiellement situés dans le Nord-Ouest de la zone Sud-Est (en particulier Haut-Languedoc, Causses, Cévennes et Monts d'Ardèche), l'arrière-pays provençal, les 2/3 nord des Landes et une partie de la Dordogne. Même si ces expansions sont très importantes, il convient de garder en tête que l'intensification va être plus forte dans les zones à risque historiques, que dans ces territoires nouvellement concernés par les feux. Ainsi, plus des deux tiers des hausses d'activité des feux induites par le changement climatique vont généralement avoir lieu dans les zones à risque historiques. Une telle intensification induira de plus grandes sollicitations des services opérationnels, qui auront davantage d'interventions concomitantes et des feux plus grands.

L'augmentation du niveau d'activité de feu va également se traduire par un allongement des périodes concernées par une activité significative au cours de l'année. Dans le cas de la zone Sud-Est, ceci se traduira par un début plus précoce et une fin plus tardive, le cœur de la saison de feu passant par ex. de 40 jours (16 juillet-24 août) à 94 jours en 2090 sous RCP 8.5 (16 juin-17 septembre). En zone Sud-Ouest, le niveau d'activité modéré serait atteint continûment entre la fin de l'hiver et l'automne en 2050, passant ainsi d'une saison de feu de niveau modéré de 176 jours pendant la période historique à 235 jours, entre le 23 février et le 15 octobre en fin de siècle sous RCP 8.5. En revanche, les 2/3 des hausses d'activité induite par le changement climatique en zone Sud-Ouest se produiront pendant la période estivale (26 juin-13 septembre).

Le rapport se poursuit sur une discussion abordant les limites des études Sud-Est et Sud-Ouest -qu'elles soient liées aux modèles climatiques et leur divergence ou aux hypothèses de modélisation- et les causes de biais potentiels (en particulier, de sous-estimation). En particulier, on notera que la saison de feu 2022 n'a pas été prise en compte dans l'ajustement des modèles, faute de données disponibles au moment de la réalisation de l'étude. La discussion se poursuit par une comparaison entre les situations des zones Sud-Est et Sud-Ouest, qui conclue que les augmentations attendues sont très importantes dans les deux zones, mais quand même plus élevées en zone Sud-Est, en particulier à partir de 2050, amplifiant ainsi les différences historiques. Elle souligne également que l'écart entre saisons extrêmes (à périodes de retour longues, supérieures à 10 ans) et saisons moyennes est plus important en zone Sud-Ouest, et que cette différence devrait se maintenir au cours du siècle. Le rapport comporte également des recommandations concernant les futures actualisations des travaux.

L'étude complémentaire « France entière » confirme une augmentation générale attendue de l'exposition aux feux de forêt dont l'amplitude varie selon les scénarios et horizons. La hiérarchie entre départements devrait être assez peu modifiée par le changement climatique. En plus des parties des zones « Sud-Est » et « Sud-Ouest » historiquement favorables aux feux, une troisième zone « Centre-Ouest » est identifiée au voisinage des Régions Centre-Val de Loire et Pays de la Loire. L'activité des feux > 20 ha s'intensifie le plus fortement dans ces trois zones. De plus, une expansion se produit au voisinage de ces zones (vers le sud, l'est et l'ouest pour la zone Centre-Ouest, et vers le centre du pays et les Pyrénées pour les zones Sud-Est et Sud-Ouest), pouvant aboutir à la réunion de ces trois zones en fin de siècle sous RCP 8.5. Les augmentations relatives du nombre de feux > 20 ha peuvent être particulièrement marquées dans certains

départements aux marges des zones historiques, qui devraient ainsi connaître les changements les plus rapides.

1. Introduction

Le changement climatique induit une augmentation du danger météorologique d'incendie de forêt en Europe (Dupuy et al. 2020 ; Ruffault et al. 2020) et notamment en France (Chatry et al. 2010; Fargeon et al. 2020). Le danger météorologique traduit l'effet des conditions météorologiques sur le risque d'incendie. En particulier, l'Indice Feu Météo (IFM)², qui synthétise les effets du vent, de la température, de l'humidité relative et des précipitations, a augmenté sur le territoire d'environ 20% depuis les années 1990. La moitié de cette augmentation peut être formellement attribuée au changement climatique d'origine anthropique (Barbero et al. 2020). Elle se traduit notamment par la survenue de conditions météorologiques favorables à des feux extrêmes, comme celles observées lors de la canicule de 2003, qui sont devenues cinquante fois plus probables entre 2008 et 2017 qu'en 1960.

Cependant, transcrire l'augmentation de l'IFM en termes d'activité des feux soulève des défis scientifiques et méthodologiques importants dus au caractère intrinsèquement multi factoriel des feux de forêt. En effet, à l'inverse du danger météo, l'activité des feux a largement décru au cours des dernières décennies avec des baisses marquées dans les années 1990, puis dans les années qui ont suivi la saison catastrophique de 2003 dans le Sud-Est de la France³. Ces diminutions, en grande partie attribuables à l'amélioration des politiques de prévention et de lutte (Castel-Clavera et al. 2022), compliquent l'exercice d'extrapolation. De plus, bien que les variations saisonnières de l'activité des feux soient plutôt bien reproduites par l'IFM, un même niveau d'IFM ne se traduit pas par une même activité des feux (en nombres de feux, surfaces brûlées, etc.) selon que l'on se trouve en Corse, dans le Var, dans la plaine de Camargue, dans les Alpes ou en Gironde, ni même selon que l'on se trouve le 15 juin ou le 31 juillet. Ces différences s'expliquent notamment par le type de végétation, la réserve utile en eau des sols, la topographie ou encore les activités humaines causant des éclosions de feux et celles visant à les combattre, qui varient fortement à l'échelle régionale. Ceci limite l'interprétation brute des dépassements de seuils de ces indices et impose de croiser cette information avec d'autres sources de données comme la sensibilité de la végétation aux incendies de forêt (Chatry et al. 2010). Fort de ce constat, INRAE a développé une approche probabiliste, *Firelihood*, dont la version originelle permet de simuler l'activité potentielle des feux d'été (de fin mai à début novembre⁴) en zone Sud-Est⁵, c'est-à-dire dans les 15 départements de la zone « Prométhée »⁶. Cette approche objective le rôle du niveau d'IFM et de variables traduisant les activités humaines et l'occupation des sols ainsi que de facteurs spatiaux non explicites (Pimont et al. 2021 ; Koh et al. 2023 ; Castel-Clavera et al. 2022). Ce modèle a été développé

² Canadian Fire Weather Index (FWI), cf. Van Wagner (1987). C'est l'indice de danger adopté par les services opérationnels en France et en Europe.

³ L'année 2003 s'est traduite par 74 200 ha brûlé en France, dont 61 500 ha en zone Prométhée (Source ONF) et plus de 700 000 ha en Europe.

⁴ Par opposition aux feux d'hiver, même si la période concernée dépasse largement l'été calendaire.

⁵ On notera que cette zone « Sud-Est » ne correspond aucunement à la « zone de défense et de sécurité Sud-Est », définies pour l'organisation de la sécurité nationale et de la défense civile et économique

⁶ <https://www.promethee.com/>

pour évaluer l'évolution future de l'activité des feux sous l'effet du changement climatique dans le cadre d'une thèse FCPR financée par le CGAER, dont l'objectif était de lever un certain nombre de verrous scientifiques, identifiés lors du rapport Chatry (2010). Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse (Fargeon 2019) ont notamment permis de confirmer une possible expansion de la zone à risque incendie de forêt vers l'Ouest de la France, conformément au rapport Chatry (2010), tout en mettant en évidence que l'amplitude des augmentations dans cette zone d'expansion faisait l'objet d'incertitudes importantes, compte tenu de la faible convergence entre modèles climatiques sur cette zone, essentiellement liée à la variabilité des régimes de précipitations (Fargeon et al. 2020). À l'inverse, la thèse a permis de montrer que l'intensification du niveau de danger était très marquée dans le Sud-Est de la France en raison de la hausse des températures, soulignant l'intérêt d'une étude ciblée concernant l'évolution du risque incendie dans la zone méditerranéenne française, qui présente de forts contrastes dans l'activité des feux.

Jusqu'en 2022, la zone Sud-Est présentait les surfaces brûlées de loin les plus importantes en France, avec des saisons particulièrement dévastatrices comme l'année 2017, ainsi que de nombreux événements individuels d'ampleur, comme le feu de Rognac en 2016 ou celui de Gonfaron en 2021. La seconde région historiquement marquée par les feux de forêt est ce que nous appellerons ici la zone Sud-Ouest, à savoir les quatre départements de la Gironde, des Landes, du Lot et Garonne et de la Dordogne. La Gironde et les Landes ont été marquées par des feux exceptionnels au cours de la saison estivale 2022, présentant des conditions exceptionnelles en matière de sécheresse de l'air et de végétation (Rodrigues et al. 2023). Ces éléments posent la question de l'évolution de l'activité des feux dans le contexte d'un danger météorologique largement accru. En zone Sud-Est, les territoires sont très hétérogènes, avec des zones de montagne jusqu'ici relativement épargnées en été, en raison d'une sécheresse moins prononcée et de températures moins élevées, alors qu'elles présentent une couverture forestière importante a priori propice à la propagation des feux. En zone Sud-Ouest, les territoires sont plus homogènes, avec peu de variabilité topographique et moins de variabilité spatiale du danger météorologique. Cependant, les activités des feux sont concentrées sur la Gironde et, dans une moindre mesure, les Landes. La question d'une potentielle expansion de la zone à risque au sein de ces deux zones, Sud-Est et Sud-Ouest, présente donc un enjeu important. Par ailleurs, l'augmentation du niveau de danger pose également la question de l'allongement des saisons de feux. En zone Sud-Est, la saison de feu estivale, devrait commencer plus précocement et se terminer plus tardivement. En zone Sud-Ouest, les deux pics d'activité (début de printemps, été) pourraient également se rapprocher, allongeant ainsi considérablement la saison d'activité des feux. Enfin, l'impact potentiel de ces augmentations d'activité, à la fois sur les écosystèmes et le dispositif de prévention et de lutte mérite d'être évalué. En particulier, la capacité du dispositif de lutte, actuellement dimensionné pour traiter un certain nombre d'événements concomitants pourrait être mise en défaut, avec une augmentation du nombre d'incidents simultanés, favorisant ainsi les feux qui échappent conduisant à des feux extrêmes.

Dans la présente étude, nous exploitons des projections climatiques de *Firelihood* sous RCP 4.5 et 8.5⁷ pour les feux dit « estivaux » (fin mai-début novembre) en zone Sud-Est et nous appliquons le même type de méthodologie pour les feux de printemps et d'été dans la zone Sud-Ouest. On notera bien que ces deux zones ne correspondent aucunement aux « zones de défense et de sécurité », définies pour l'organisation de la sécurité nationale et de la défense civile et économique. Pour la zone Sud-Est, il n'a pas été possible de développer de modèle probabiliste des feux d'hiver, faute de temps⁸. Pour la zone Sud-Ouest, une nouvelle version du modèle *Firelihood* a été développée sur les mêmes bases scientifiques que la version originelle, c'est-à-dire une prédiction de l'occurrence des feux de 1 ha, ainsi que des tailles de ces feux, essentiellement à partir de l'IFM et de la surface forestière. En complément, l'approche probabiliste développée dans le cadre de travaux menés pour la Direction Générale de la Prévision des Risques avec l'ONF, permet une projection « France entière » de l'activité des feux estivaux « significatifs », c'est-à-dire supérieur à 20 ha, présentée au chapitre 6 du présent rapport. Pour l'ensemble de ces modèles probabilistes, on notera que la saison de feu 2022 n'a pas été prise en compte dans l'ajustement des modèles, faute de données disponibles au moment de la réalisation des études⁹. Nos projections ne prennent donc pas en compte les modifications de relation entre les activités de feu et du climat qui ont pu émerger à cette occasion, en particulier hors zone Sud-Est. Nous reviendrons sur les conséquences de cette limite dans le rapport.

Les projections d'activités des feux issues des modèles probabilistes sur les zones Sud-Est et Sud-Ouest permettent d'analyser de manière détaillée l'évolution potentielle dans des territoires déjà exposés au risque incendie de forêt. Il convient de noter que les projections climatiques d'indice de danger font l'objet d'un niveau d'incertitude très élevé, y compris pour un scénario donné, en raison des divergences entre modèles sur l'évolution du niveau de sécheresse et de la variabilité du climat (Fargeon et al. 2020), mais aussi de la stochasticité entre feu et climat (Pimont et al. 2023 in prep.). Ces incertitudes seront abordées dans les résultats et leur discussion, mais le rapport se concentrera sur une présentation des trajectoires les plus plausibles compte-tenu des connaissances scientifiques disponibles, sous forme de moyennes des différents modèles climatiques selon chaque scénario, pour des tendances moyennes, décennale et extrême pour différentes métriques. Nous analyserons également l'expansion de la zone à risque, l'allongement de la saison de feu, ainsi que certaines caractéristiques des impacts attendus, à la fois sur les écosystèmes et les politiques de prévention et de lutte.

Après une présentation de la méthodologie au chapitre 2, les analyses concernant les zones Sud-Est et Sud-Ouest seront présentées aux chapitres 3 et 4, qui s'achèveront chacun sur une synthèse d'une page de ces analyses, respectivement dans les sections 3.6 et 4.5. La discussion présentée au chapitre 5 abordera les incertitudes, des comparaisons entre les

⁷ Scénarios issus de l'IPCC Assessment Reports, représentatifs des trajectoires de forçage radiative les plus probables. Le RCP 4.5 correspond à une stabilisation des émissions autour de 2050, alors que le RCP 8.5 correspond à une augmentation non maîtrisée des émissions

⁸ Travaux en cours, dans la thèse J. Castel-Clavera à INRAE.

⁹ Les données météorologiques de réanalyse SAFRAN (Vidal et al. 2008) que l'on utilise pour les calculs d'indices de danger feu sont produites annuellement par Météo-France pour des périodes allant du 1^{er} août au 31 juillet de l'année suivante. La seconde moitié de la saison estivale n'est donc disponible qu'un an après la première moitié, ce qui retarde l'inclusion des données dans les modèles probabilistes. Par ailleurs, l'intégralité des données feu de 2022 n'était pas disponible.

zones Sud-Est et Sud-Ouest, ainsi qu'une série de recommandations pour les futures études.

2. Présentation succincte de la méthode pour les zones « Sud-Est » et « Sud-Ouest »

Cette section fournit l'information indispensable à la bonne compréhension de l'étude, les détails méthodologiques étant décrits dans l'**Annexe A**. Par ailleurs, une description complète de l'approche utilisée sur la zone Prométhée est présentée dans un article publié dans la revue *International Journal of Wildland Fire* (Pimont et al. 2022). L'approche s'appuie sur des projections quotidiennes d'indices Feu-Météo à une résolution de 8 km (section 2.1), qui sont ensuite utilisées pour simuler des activités de feux futures grâce aux modèles probabilistes (section 2.2). Ces activités de feux simulées sont ensuite analysées en détails à différentes échelles spatio-temporelles. En section 2.3, nous évaluons les conséquences des sélections de modèles climatiques et présentons l'approche par degrés de réchauffement global qui figure dans la Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC), mise en consultation au moment de la remise du présent rapport (le 23 mai 2023, voir MTECT 2023 a&b).

2.1. Projections d'Indices Feu-Météo (IFM) pour la période 2001-2100

L'étude s'appuie sur des projections d'IFM calculées à partir de simulations climatiques obtenues dans le cadre du projet d'inter-comparaison des modèles couplés CMIP5, qui fournit des simulations « historiques » jusqu'en 2005 puis des projections climatiques jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle selon deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et 8.5 pour la période 2006-2100.

Deux jeux de données ont été utilisés dans la présente étude. Le premier s'inscrit dans la poursuite des travaux de thèse d'Hélène Fargeon (Fargeon et al. 2020), qui avait travaillé avec 5 couples GCM/RCM¹⁰ d'EURO-CORDEX (Kotlarski et al. 2014) permettant de projeter le climat futur à l'échelle journalière et 50 km de résolution. Ces données avaient ensuite été descendues à l'échelle des points de grille de 8 km grâce à la réanalyse SAFRAN (Vidal et al. 2010) et des corrections de biais quantile/quantile mensuelles (Cannon et al. 2018). Ces projections d'IFM dit « jour » sont calculées à partir des données de température moyenne, de vent moyen, d'humidité relative minimale et précipitations journalières, selon la méthode de Bédia et al. (2014). Cette approche a par la suite été étendue à 16 modèles GCM/RCM d'EURO-CORDEX pour les RCP 4.5 et 8.5 en zone Sud-Est (Pimont et al. 2022), ainsi que pour les quatre départements de la zone Sud-Ouest. Dans la suite, ce jeu de données de projection sera appelé jeu « INRAE » (voir Annexe A, **Table A.1**).

Le second jeu de données de projection d'IFM a été fourni par Météo-France dans le cadre de DRIAS 2020. Il s'agit de projections issues de la même campagne EURO-CORDEX, mais elles présentent néanmoins quatre différences principales avec les données « INRAE » : (i) la sélection de modèle n'est pas la même, avec 12 simulations pour le RCP 8.5 et 10 pour le RCP 4.5, dont certains ont été corrigés, même si plusieurs « runs » sont communs aux deux jeux de données ; (ii) les projections DRIAS sont horaires et non journalières, ce qui permet de calculer les IFM horaires, dont l'IFM12 estimé à midi et l'IFMx au maximum de la journée, mais implique un volume de données à traiter de l'ordre de 20 fois plus important ; (iii) elles s'appuient sur une méthode de descente d'échelle plus sophistiquée que la méthode INRAE, qui conditionne notamment la descente d'échelle et le dé-biaisage des

¹⁰ GCM : modèle de circulation général, RCM modèle climatique régional

simulations climatiques à des « types de temps » saisonniers déterminés à partir du géopotential à 500 hPa (Verfaillie et al. 2017) ; les données utilisées pour cette descente d'échelle sont également celles de la réanalyse SAFRAN mais pour la période 1980-2010.

Compte-tenu de la mise à disposition tardive des données DRIAS 2020 concomitante avec d'autres travaux à mener pour le compte de la DGPR, il n'a pas été possible de réaliser l'ensemble des projections d'activités avec les données DRIAS 2020. Cependant, un exercice de comparaison a été conduit sur l'ex-Aquitaine. Il est présenté en section 2.3. De plus, l'étude de projection « France entière » a été intégralement réalisée avec les données DRIAS 2020.

Par ailleurs, il est important de noter que ces projections d'IFM, qu'elles soient issues de DRIAS 2020 ou des calculs INRAE, sous-estiment les observations dans la période 2001-2020 dans la zone Sud-Est et dans la zone Sud-Ouest. Ce point est illustré sur la **Figure 2.1** ci-dessous, qui représente les moyennes annuelles estivales observées d'IFM12 (issus de la réanalyse SAFRAN, en noir) à comparer avec la moyenne des projections d'IFM12 pour la sélection de modèles issues de DRIAS, représentée avec la variabilité entre modèles (barre verticale rouge). Ces résultats sont conformes avec une étude INRAE précédente, qui avait montré que seulement 50% de l'augmentation d'IFM observée dans les années 2000 était prédite par les modèles climatiques d'EURO-CORDEX (Barbero et al. 2020).

Plusieurs éléments peuvent expliquer ce phénomène : (i) les projections climatiques ne cherchent pas à reproduire la météorologie réellement observée pendant la période historique 2001-2020, mais une météorologie « potentielle » représentative du climat de la zone d'étude. La hausse observée dans les années 2000-2020 pourrait donc avoir été amplifiée par une fluctuation naturelle du climat en zones Sud-Est et Sud-Ouest ; le fait que les corrections de biais des modèles climatiques s'appuient pour les 2/3 sur des données datant d'avant 2000¹¹, donc pour l'essentiel antérieures à la hausse observée en 2000, pourrait expliquer l'apparente sous-estimation des projections pour 2001-2020 ; (ii) la pollution aux aérosols qui a diminuée à partir des années 1990 aurait pu artificiellement refroidir le climat dans ces années, ce qui aurait pu induire un forçage trop froid des modèles de projections climatiques¹² ; (iii) les projections climatiques sous-estiment l'amplitude du réchauffement. Selon les deux dernières hypothèses, les projections d'activités qui découlent de ces projections d'IFM auront donc tendance à sous-estimer les activités futures. Dans tous les cas, elles sous-estimeront l'activité réellement observée dans cette période « historique » 2001-2020 et pourront donner l'impression que les projections sont « en retard » par rapport aux observations.

¹¹ 1990-2005 pour le jeu de données INRAE et 1980-2010 pour le jeu DRIAS 2020.

¹² Les GCM montrent que les aérosols auraient eu un effet refroidissant sur le climat dans les années 1950-1970, qui aurait diminué à partir des années 1990 (réduction des CFC, etc.). Il y a une grosse incertitude entre les modèles sur ces tendances et leurs effets directs (lié à une augmentation de l'albédo) et indirects (interaction aérosols-nuages et précipitations). Le climat simulé par les GCM pourrait donc sous-estimer la température des dernières décennies, à cause d'une surestimation de l'effet refroidissant des aérosols. Cet effet serait encore plus marqué avec les RCM utilisés dans les projections du présent rapport, car la plupart d'entre eux font l'hypothèse que les concentrations en aérosols anthropiques ne changent au cours du temps.

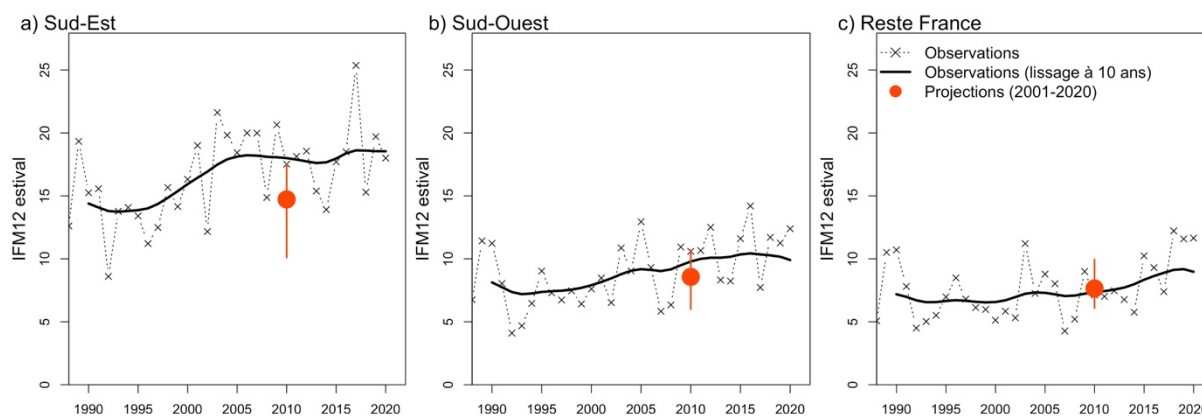


Figure 2.1. Comparaison entre les observations d'IFM12 calculés à partir de la réanalyse SAFRAN (en noir, lissé à 10 ans ou non) avec les projections issues des modélisations DRIAS pour le RPC 8.5 entre 2001 et 2020, **(a)** en Zone Sud-Est, **(b)** en Zone Sud-Ouest, **(c)** dans le reste de la France. La barre verticale rouge montre l'amplitude des variations entre le modèle présentant l'IFM le plus élevé (HadGEM2-ES_CCLM4-8-17) et celui présentant l'IFM le plus faible (IPSL-CM5A-MR_WRF381P). On note au passage que le niveau de danger saisonnier moyen est nettement plus marqué en zone Sud-Est que dans le reste de la France, en particulier depuis le début des années 2000. En zone Sud-Ouest, l'IFM12 progresse également, même si le niveau moyen est modéré entre 1990 et 2020, malgré certains pics comme en 1989, 1990 ou 2003, correspondant à une activité des feux de forêt accrue.

2.2. Projections d'activité de feu par l'approche Firelihood

Firelihood a initialement été développé pour simuler de manière probabiliste l'activité des feux estivaux de la zone Sud-Est (Pimont et al. 2021), c'est-à-dire leur nombre et leur taille, à partir d'IFM journaliers. Pour chaque projection climatique, nous avons donc calculé 300 tirages d'activités de feux potentielles dans chaque pixel et pour chaque jour de la saison estivale entre 2001 et 2100, permettant de reproduire la diversité des activités de feux pouvant se produire selon chaque projection. Cette approche permet ainsi de projeter des activités moyennes et des activités extrêmes, présentant une fréquence de retour plus faible. *Firelihood* a été étendu à la zone Sud-Ouest (4 départements), avec un modèle simulant les activités de feux quotidiennes pour l'ensemble de l'année.

Pour chaque projection climatique, *Firelihood* (illustré **Fig. 2** sur la zone Sud-Est) utilise les données d'IFM ainsi que les surfaces forestières combustibles (**Fig. 2.2a**), ainsi que de différents effets spatio-temporels destinés à corriger les biais des variables explicites¹³, pour estimer des probabilités d'occurrence et une distribution de tailles de feux estivaux potentielles pour chaque jour de la période 2001-2099 (entre le 27 mai et le 5 novembre) et dans les 1143 « pixels SAFRAN » de 8 km correspondant à la zone Sud-Est (**Fig. 2.2b**). La zone Sud-Ouest en compte 520. A partir de ces probabilités, le modèle calcule ensuite 300 simulations des activités de feux journalières potentielles dans chaque pixel (nombre de feux et leur taille, **Fig. 2.2c**). L'information concernant les grandes tendances émerge de l'agrégation des activités journalières sur des périodes de 20 ans, qui permet de déterminer

¹³ Ces effets jouent le rôle de corrections saisonnières ou spatiales et permettent d'augmenter la vraisemblance des activités de feux simulées par le modèle

des caractéristiques générales de l'activité des feux (**Fig. 2.2d**), au-delà de la variabilité de court terme liée à la météorologie, aux variations interannuelles du climat et aux aléas de l'éclosion, de la propagation et de l'extinction des feux.

On s'intéressera ici essentiellement à quatre métriques, permettant de synthétiser l'activité des feux d'un territoire. En premier lieu, *le nombre de feux > 1 ha (N1ha)* correspond aux feux « qui échappent » à l'attaque sur feu naissant, qui vise à limiter le nombre de feux dépassant ce seuil. Bien que le seuil de 1 ha soit faible, il permet de caractériser finement l'occurrence. Ensuite, *le nombre de feux > 100 ha (N100ha)* correspond au nombre de « grands feux », nécessitant un engagement important des forces de lutte. La troisième métrique, *la surface brûlée totale (en ha)¹⁴*, synthétise à la fois l'occurrence et les tailles de feux (> 1 ha), même si cette métrique présente des niveaux d'incertitude particulièrement élevés, fortement dépendants d'un petit nombre d'évènements extrêmes (Pimont et al. 2021). Enfin, dans le cas de la zone Sud-Ouest, dans laquelle le nombre de grands feux est nettement moins important que dans le Sud-Est, il a été jugé utile d'introduire *le nombre de feux > 20 ha (N20ha)*, qualifié ici de « feux significatifs », qui constitue déjà un événement assez rare en zone Sud-Ouest, avec seulement 64 feux de plus de 20 ha observés entre 2006 et 2020.

Afin de quantifier l'amplitude des effets du changement climatique, nous avons défini une activité de feu « climatologique » de référence sur 20 ans, correspondant à *la climatologie 2001-2020*, afin de disposer d'une référence suffisamment représentative des variabilités interannuelles du climat (voir par ex, **Fig. 2.1**). En zone Sud-Est, en termes d'activité des feux, cette « référence climatologique » est en fait plutôt représentative de la période 2004-2020, pendant laquelle la relation feu-climat a été plutôt stable, après les baisses d'activité très significatives qui ont suivi la crise de 2003 (Pimont et al. 2001 ; Castel-Clavera et al. 2022). En zone Sud-Ouest, elle est représentative des activités de la période 2006-2020, 2006 marquant le début des enregistrements systématiques d'activité de feu nécessaire à l'élaboration du modèle probabiliste.

Contrairement aux indices de danger comme l'IFM, les métriques ci-dessus sont additives et non biaisées dans le temps et l'espace, ce qui facilite leur agrégation à différentes échelles. Ces projections doivent cependant être considérées comme de la prospective, car elles s'appuient sur des hypothèses fortes. En particulier, seul le climat évolue au cours du temps et l'extrapolation suppose que la relation entre activité du feu et climat est constante. Ainsi, les éventuelles évolutions de la composition et de la structure de la couverture végétale, qu'elles soient liées aux changements climatiques ou d'occupation des sols, ou encore aux passages répétés des incendies, ne sont pas prises en compte dans l'étude. Les activités et les infrastructures humaines, qui influencent aussi très largement l'activité des feux, sont implicitement prises en compte par la version du modèle *Firelihood* utilisée dans l'étude, mais elles sont considérées comme constantes dans le temps dans ce travail de prospective. D'autres hypothèses sont discutées au chapitre 5.

¹⁴ Il s'agit de la somme des tailles des feux > 1 ha, les feux de taille inférieure contribuant de manière marginale au bilan global

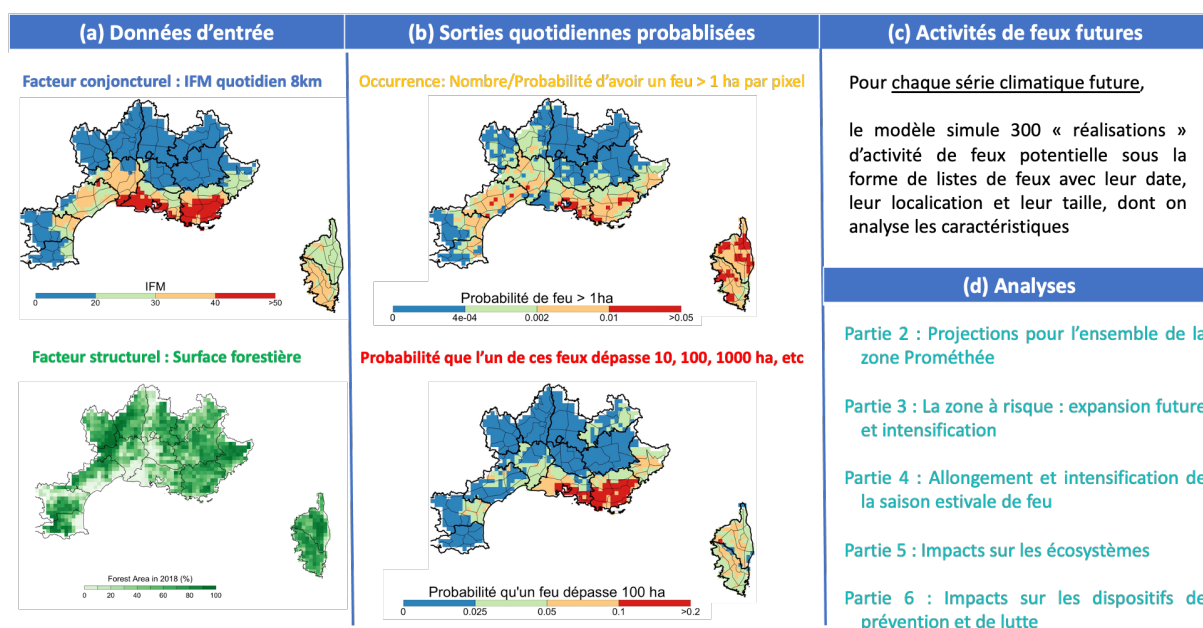


Figure 2.2. Présentation schématique du fonctionnement de *Firelihood* et de son application pour la zone Sud-Est. A partir des cartes d'IFM quotidien et de la présence de matériel combustible **(a)**, le modèle calcule les probabilités d'occurrence de feu (> 1 ha), ainsi que les probabilités que les feux atteignent différentes tailles **(b)**. Ces probabilités sont calculées pour chaque série climatique et peuvent être traduites en 300 séries d'activité des feux potentielle **(c)**, qui peuvent être combinées pour examiner différents aspects de l'activité des feux potentielle dans le futur **(d)**.

2.3. Compatibilité des jeux de données climatiques INRAE et DRIAS 2020

Comme expliqué ci-dessus, il n'a été possible de réaliser l'ensemble des projections d'activité avec les données DRIAS 2020, faute de temps. Cependant, afin de s'assurer de la compatibilité entre l'étude nationale de Météo-France et les études régionales d'INRAE, nous avons comparé les projections d'activité de feu obtenues sur la zone Sud-Ouest. Pour cela, le modèle *Firelihood* Sud-Ouest a été réajusté à partir de l'IFMx de Météo-France sur la période historique 2006-2020 et a ensuite été projeté à partir des 12 modèles DRIAS 2020 du RCP 8.5 (pour 50 simulations de *Firelihood*). Les projections de différentes métriques d'activité (feux de plus de 1, 20, 100 ha et surfaces brûlées annuelles), avec un lissage sur 30 ans sont présentées en bleu pour les 12 modèles dans la **Figure 2.3**, le trait bleu plus épais correspondant à la moyenne multi-modèle. Parmi les 16 modèles disponibles dans le jeu de données INRAE, nous avons sélectionné les 10 modèles les plus proches de ceux utilisés dans DRIAS 2020 (voir annexe A), certains étant identiques. Ces 10 modèles INRAE, les plus similaires à DRIAS, sont représentés en vert dans la Figure 2.3.

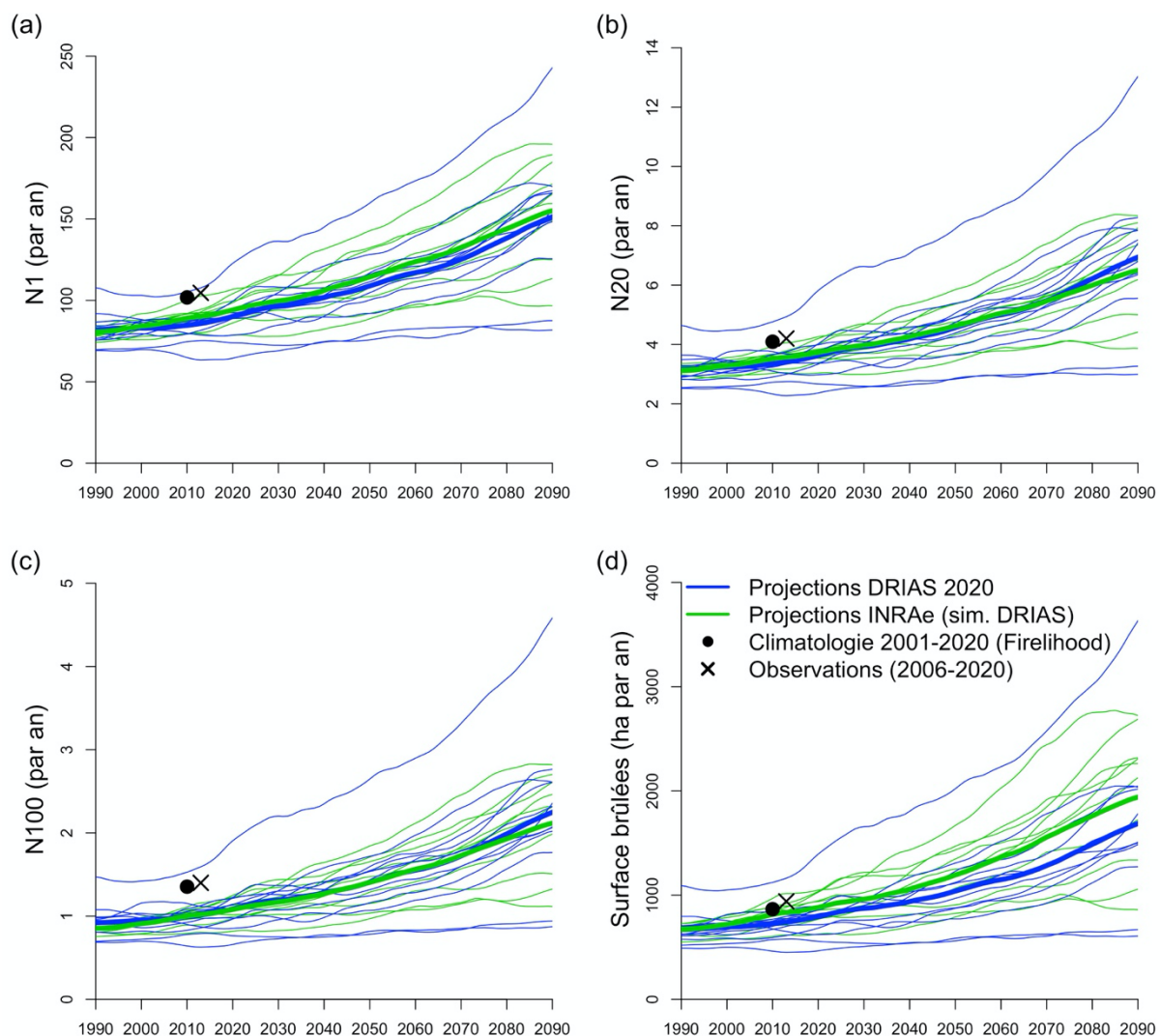


Figure 2.3. Projections d'activités de feux pour le jeu de données DRIAS 2020 (en bleu) et INRAE (en vert), lorsque l'on choisit les 10 modèles les plus similaires à ceux retenus par Météo-France au sein des 16 disponibles dans le jeu INRAE. Quatre métriques d'activité sont présentées : **(a, b, c)** feux de plus de 1, 20 et 100 ha et **(d)**, surfaces brûlées.

Les simulations issues de DRIAS 2020 présentent une variabilité multi-modèle (spread) un peu plus marquée avec une plus grande différence entre modèles selon que le niveau de danger projeté plus importante que les simulations INRAE. Cependant, les tendances moyennes sont très voisines, ce qui montre que les projections moyennes sont équivalentes. La différence de spread s'explique probablement par les différences entre méthodes de descente d'échelle employée par Météo-France et INRAE, la méthodologie INRAE ayant tendance à réduire le spread sur la période où les corrections de biais sont appliquées (1990-2005). On notera cependant une légère différence dans les projections de surfaces brûlées (**Fig. 2.3.d**), les augmentations de DRIAS 2020 étant légèrement

inférieures à celles du jeu de données INRAE¹⁵, mais ces différences demeurent marginales au regard des incertitudes entre modèles climatiques. Ces résultats permettent de penser que les projections d'activité réalisées en zones Sud-Ouest et Sud-Est dans le présent rapport sont compatibles avec les travaux menés à l'échelle nationale.

On notera cependant que la sélection de modèles utilisés par INRAE dans Pimont et al. (2022) et dans le rapport préliminaire remis aux Inspecteurs Généraux en août 2022, conduisait à des niveaux d'activités plus marqués (**Figure 2.4**), qui s'expliquent essentiellement par deux modèles « chauds » non pris en compte dans DRIAS (les modèles australien CSIRO-Mk3/RCA4 et canadien CanESM2/RCA4), alors que les deux modèles Français très « froids », ne prévoyant aucune augmentation en 2090 sous RCP 8.5 en Aquitaine, n'étaient pas disponibles au moment de la réalisation de l'étude INRAE (CNRM-CM5/RACMO22E et IPSL-CM5A-MR/WRF381P) ou présentaient des problèmes identifiés¹⁶ (voir Annexe A, **Table A.3**).

Afin de préserver la cohérence entre les travaux nationaux et dans les zones Sud-Est et Sud-Ouest, le choix a été fait d'utiliser dans le reste du rapport la sélection de modèle la plus proche de DRIAS 2020, mais l'on notera qu'il n'y a a priori aucune raison d'exclure les modèles australien et canadien présentant des trajectoires plus alarmantes. Nous reviendrons sur ces éléments dans les remarques conclusives. En particulier, les résultats présentés ici pour la zone Sud-Est sont légèrement plus optimistes que dans le rapport préliminaire d'août 2022 ou dans Pimont et al. (2022), comme le montre les comparaisons des différentes métriques obtenues avec la sélection de modèles proches de DRIAS (**Annexe B. Tables B.1 et B.2**) et celles du rapport préliminaire (**Annexe B. Tables B.1bis et B.2bis**).

¹⁵ Celles-ci pourraient s'expliquer par les différences entre IFM, l'IFMx pouvant augmenter moins en proportion que l'IFM « jour » d'INRAE dans ses valeurs les plus élevées, car l'IFMx donne un poids plus important au vent maximum journalier, alors que celui-ci n'évolue pas significativement sous l'effet du climat, contrairement à la température et à l'humidité relative.

¹⁶ http://www.drias-climat.fr/document/Doc-Limitation-Simulations-EUROCORDERX-2014_v20201130.pdf

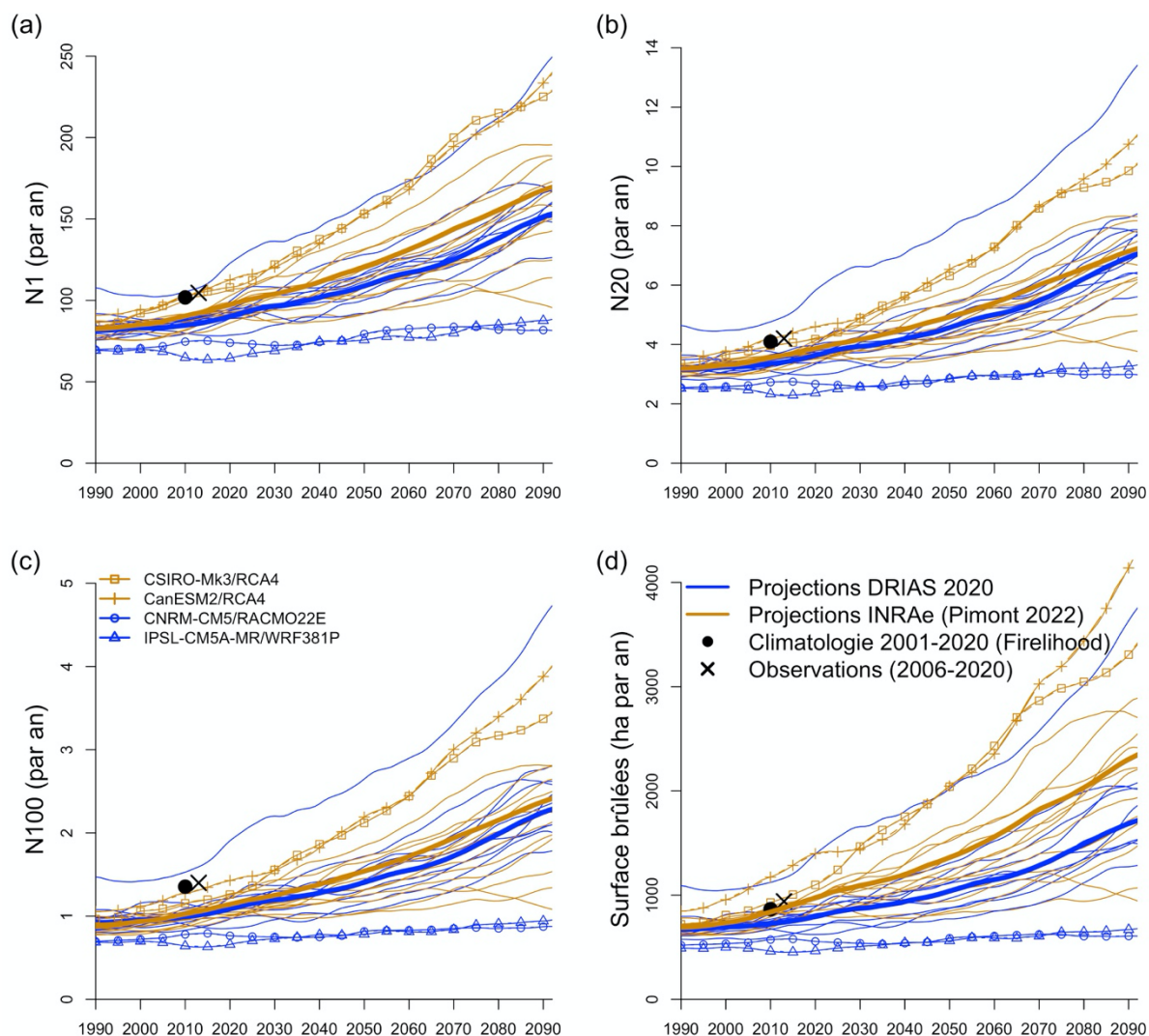


Figure 2.4. Projections d’activités de feux pour le jeu de données DRIAS 2020 (en bleu) et INRAE (en marron), à partir de la sélection de 13 modèles d’INRAE de l’étude Pimont et al. 2022 et du pré rapport d’août 2022. Quatre métriques d’activité sont présentées : **(a, b, c)** feux de plus de 1, 20 et 100 ha et **(d)**, surfaces brûlées. Les différences s’expliquent essentiellement à cause de 2 modèles prédisant des niveaux d’activité et des augmentations (australien CSIRO-Mk3/RCA4 et canadien CanESM2/RCA4) bien plus élevés que deux modèles Français (CNRM-CM5/RACMO22E et IPSL-CM5A-MR/WRF381P).

2.4. Horizons temporels, scénarios, degrés de réchauffement global et TRACC

Dans le présent rapport, l’essentiel des résultats est présenté selon les deux scénarios RCP 4.5 et 8.5 à différents horizons (2001-2020, comme référence, 2030, 2050, 2070 et 2090). Les résultats qui en découlent dépendent donc de la définition de ces scénarios, de l’évolution des trajectoires et des modèles climatiques qui présentent de fortes incertitudes, liées à la fois à la stochasticité du climat et aux incertitudes portant sur les modèles eux-mêmes. Dans ce contexte, le GIEC et la communauté scientifique préfèrent harmoniser les projections selon un référentiel commun en raisonnant par degrés de réchauffement global (au niveau mondial), de +1.5°C à +4°C. L’approche par degrés de réchauffement global

sélectionne les périodes pendant lesquelles chaque modèle climatique « GCM » atteint un niveau de réchauffement cible à l'échelle globale (au niveau mondial). Ces périodes seront différentes selon les modèles climatiques « GCM », induisant une incertitude temporelle sur l'échéance correspondante. L'approche par degrés de réchauffement présente l'avantage de faciliter et d'homogénéiser le discours (quelles seront les activités des feux dans un monde à +2°C ou +4°C ?) et de réduire l'incertitude liée aux modèles climatiques, puisque la convergence forcée des modèles vers le même niveau de réchauffement à l'échelle globale gomme une partie des différences entre modèles climatiques. Par exemple, les travaux de Pimont et al. 2022 de projection d'activités des feux sur la zone Sud-Est publiés dans la revue *International Journal of Wildland Fire* sont présentés par degrés de réchauffement global.

Suivant les recommandations du rapport des sénateurs Roux et Dantec¹⁷ sur l'adaptation au changement climatique et du dernier rapport du Haut Conseil pour le Climat¹⁸, la DGEC travaille actuellement à l'élaboration d'une Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC), visant à harmoniser la mise en œuvre de la politique d'adaptation à l'échelle locale. Au moment de la remise du présent rapport, la trajectoire envisagée suivante a été publiée (le 23 mai 2023) et mise en consultation : +1.5 °C en 2030, +2 °C en 2050, +3°C en 2100 (MTECT 2023 a&b).

La **figure 2.5** positionne cette TRACC (en orange) par rapport aux horizons auxquels les différents degrés de réchauffement sont atteints selon les scénarios RCP 4.5 (en bleu) et 8.5 (en rouge) de CMIP5 utilisés dans le reste du rapport. Cette figure illustre que la TRACC est proche du scénario RCP 4.5 au regard des modèles sélectionnés dans DRIAS 2020, quoique légèrement « en retard » en ce qui concerne le court terme (+1.5°C et +2°C). En effet, selon les GCM utilisés dans nos études et les RCP, +1.5°C puis +2°C seraient plutôt successivement atteints entre 2022 et 2026, puis 2037 et 2048. +3°C seraient ensuite atteints entre 2060 pour le 8.5 et 2092 selon le RCP 4.5. Enfin, +4 °C de réchauffement global seraient atteints en 2092 sous RCP 8.5 uniquement.

A titre de comparaison, l'annexe 1 de MTECT (2023b, p22) reprend les travaux du GIEC de 2021 correspondant à la dernière campagne CMIP6¹⁹, qui estime les réchauffements globaux à respectivement + 1.5°C pour 2030, + 2.0 °C pour 2050 et 2.7 °C pour 2090 selon le scénario « SSP2-4.5 », et + 1.6°C pour 2030, + 2.4 °C pour 2050 et 4.4 °C pour 2090 selon le scénario « SSP2-8.5 ». Ces estimations apparaissent cohérentes avec celles des RCP 4.5 et 8.5 des GCM utilisés dans la présente étude (**Fig. 2.5**).

¹⁷ « Quel scénario choisir pour prendre dès aujourd'hui les décisions d'adaptation de très long terme ? [...] il est important que les pouvoirs publics, avec l'aide des scientifiques, établissent clairement les paramètres climatiques et les marges de sécurité à prendre en compte. »

¹⁸ « Six pistes pour consolider l'évaluation, le suivi et la mise en œuvre des politiques d'adaptation. Piste 4 : Définir un niveau de réchauffement pertinent pour les politiques d'adaptation. Le niveau de réchauffement choisi pour calibrer les différents instruments déterminera l'ampleur des efforts d'adaptation à anticiper, planifier et financer. [...] La planification territoriale multi-échelle, inscrite dans le cadre d'une stratégie d'aménagement du territoire, peut être un instrument pertinent, qui demande toutefois de définir en amont les niveaux de réchauffement, et les critères d'habitabilité et d'usage des territoires dans un climat qui change. »

¹⁹ DRIAS 2020 correspond à CMIP5 et s'appuie sur les « RCP »

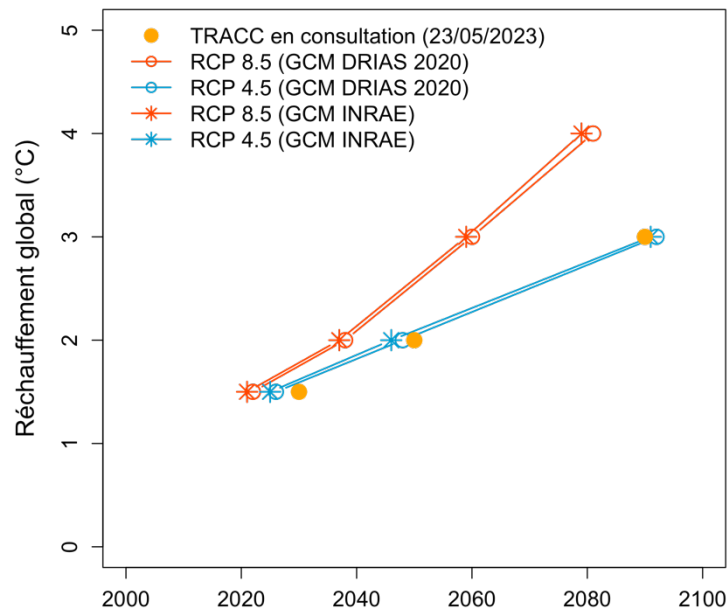


Figure 2.5. Trajectoire de Réchauffement de référence d'Adaptation au Changement Climatique mise en consultation le 23/05/2023 (MTECT 2023 a&b) et sa correspondance avec les modèles climatiques « GCM » utilisés dans DRIAS 2020 et les projections INRAE pour les RCP 4.5 (en bleu) et 8.5 (en rouge). On notera que les sélections INRAE et DRIAS sont très similaires, confortant la compatibilité entre les études nationales et celles des zones Sud-Est et Sud-Ouest.

Pour finir, on notera que les documents ministériels (MTECT 2023 a&b) fournissent une correspondance entre les niveaux de réchauffement global (au niveau mondial : +1.5 °C en 2030, +2 °C en 2050 et +3° C en 2100) et les niveaux de réchauffement en France métropolitaine (+2 °C en 2030, +2.7 °C en 2050 et +4° C en 2100). Cette correspondance permet de préciser que le réchauffement projeté pour la France métropolitaine est plus élevé que la moyenne mondiale à scénario d'émission égal. Il convient cependant de ne pas faire de confusion entre l'échelle Française et l'échelle globale, puisque les +4 °C de réchauffement global dépassés en fin de siècle sous RCP 8.5 correspondent à un niveau de réchauffement bien plus élevé que le +4 °C en 2100 du territoire métropolitain (voisin du RCP 4.5 et correspondant à +3°C au niveau global).

3. Projections en zone Sud-Est (zone Prométhée)

3.1. Projections pour l'ensemble de la zone Sud-Est

Dans cette section, on s'intéresse aux tendances globales de l'activité estivale des feux sur l'ensemble de la zone Prométhée, afin de caractériser de manière quantitative comment le changement climatique anthropique pourrait se traduire en termes d'activité des feux potentielle dans le futur.

Évolution de l'activité moyenne des feux

La **Figure 3.1** présente l'évolution de l'activité des feux annuelle moyenne pour le RCP 4.5 (bleu) et 8.5 (rouge) et ceci pour 3 métriques : **(a)** le nombre de feux > 1 ha, **(b)** le nombre de feux > 100 ha et **(c)** les surfaces brûlées. Il s'agit ici de moyennes sur 20 ans. Un second axe des ordonnées, à droite des graphiques, permet de traduire les augmentations en termes de pourcentages, par rapport à la référence correspondant au climat projeté par les modèles climatiques pour la période de référence 2001-2020. Cette projection est inférieure à l'activité de feu réellement observée sur la période 2004-2019 ou à celle simulée pour la climatologie réellement observée entre 2001 et 2020 à partir de *Firelihood* et des IFM issus de SAFRAN en noir. Comme expliqué dans les sections 2.1 et 2.3, ceci s'explique par le fait que l'IFM projeté à partir des modèles climatiques sur cette période en zone Sud-Est est nettement plus faible que ce qui a été observé sur cette période (**Figure 2.1a**), pouvant donner l'impression que les observations sont en avance sur les projections. On notera cependant que les ordres de grandeur projetés sont cohérents.

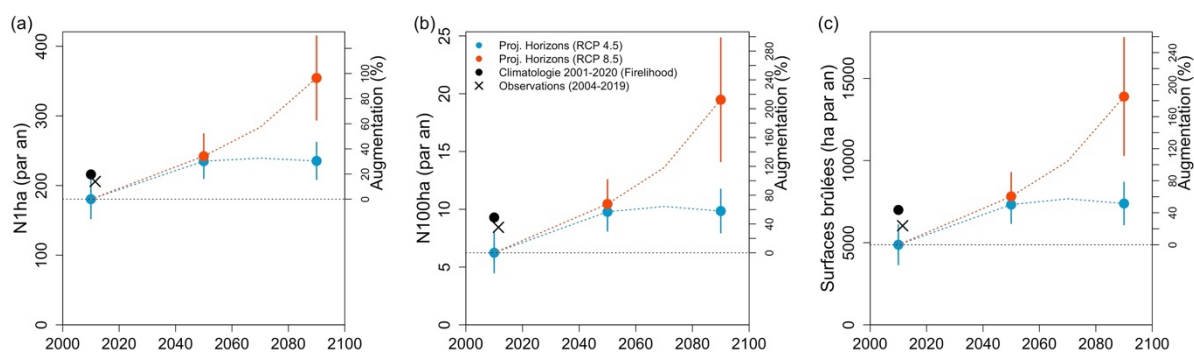


Figure 3.1. Projections d'activité des feux au 21^{ème} siècle pour **(a)** le nombre de feux qui échappent (> 1 ha), **(b)** le nombre de grands feux (> 100 ha) et **(c)** les surfaces brûlées, selon deux scénarios (RCP 4.5 en bleu et 8.5 en rouge). Les différents horizons correspondent à des moyennes annuelles pour des périodes de 20 ans. Les barres verticales représentent l'écart type lié à l'incertitude entre modèles climatiques (+/- un écart type). Les croix noires représentent les observations issues de la base Prométhée pour la période estivale pour les années 2004-2019 (correspondant à une relation feu climat stable). Les points noirs correspondent à des simulations *Firelihood* pour la période 2001-2020 réalisée à partir des IFM observés (calculés à partir de SAFRAN), ce qui constitue une référence climatologique historique pour la période 2001-2020.

Selon le scénario RCP 4.5, N1ha passerait de 180 à 234 par an en 2050, soit une augmentation de 30% et se stabiliserait autour de 235 par an en fin de siècle (+30%). Sous RCP 8.5, la trajectoire des N1ha serait similaire jusqu'en milieu de siècle (242 feux par an, +34%), mais divergerait ensuite avec une accélération exponentielle en milieu de siècle

(354 feux par an, +96%). Ces valeurs sont légèrement inférieures à celles du rapport intermédiaire qui s'appuyait sur la sélection des 13 modèles INRAE utilisées dans Pimont et al. (2022), mais les ordres de grandeurs restent très proches. Les tendances générales sont similaires pour les grands feux et les surfaces brûlées, mais les augmentations sont beaucoup plus importantes. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation du danger accroît non seulement les probabilités d'éclosion et la propagation initiale, favorisant ainsi le nombre de petits feux, mais également leur développement au-delà de 1 ha. Le nombre annuel de grands feux passerait donc d'une moyenne de 6.2 feux par an à 10.5 en 2050, pour dépasser 19 en fin de siècle en RCP 8.5 (+212%). Les surfaces brûlées augmenteraient d'environ 185% dans les mêmes conditions. L'ensemble des métriques correspondantes sont rapportées dans des tableaux présentés en **Annexe B (Table B.1 et B.2)**.

Les barres verticales de la **Figure 3.1** représentent l'incertitude liée au choix de modèle climatique (une fois l'écart type des différences entre les 10 modèles les plus proches de la sélection DRIAS). L'importance des augmentations prédites excède toutefois l'ampleur des incertitudes entre modèles. On notera cependant que l'incertitude est ici calculée en moyenne pour des périodes de 20 ans, alors que la variabilité interannuelle de l'activité des feux est très importante. A l'échelle annuelle, cette variabilité naturelle (du climat et des feux) est telle que l'on continuera à observer régulièrement en fin de siècle des saisons de feux de niveau comparable à la période historique, y compris en RCP 8.5, mais elles seront de moins en moins fréquentes. A l'inverse, les saisons extrêmes seront de plus en plus marquées (voir Section 3.2). Cette variabilité naturelle peut constituer un frein à la perception de l'accroissement du danger lors des années de faible activité d'incendie, ou au contraire l'exacerber les années de forte activité, avec des implications possibles pour la stratégie publique d'adaptation.

Par rapport aux incertitudes, il convient de rappeler que les projections sont sensibles au choix de la période de référence retenue pour l'activité des feux (ici une période représentative de l'activité observée sur la période 2004-2019). Nos projections auraient été dans l'ensemble deux fois plus élevées si nous avions choisi la période 1995-2003 pour établir la relation feu-climat, en raison des progrès de la prévention et de la lutte réalisés dans la zone Sud-Est après 2003. Dans cette étude, nous avons fait l'hypothèse que la politique de prévention et de lutte conservera la même efficacité qu'au cours de la période de référence d'activité des feux 2004-2019, malgré l'augmentation du danger météorologique. Ce point crucial est discuté dans le chapitre 5.

Pour finir, l'approche présentée ici s'appuie sur des scénarios RCP et des horizons (2010, 2050, 2090) conformément aux demandes des trois Ministères. Cependant, dans le contexte de la mise en place de la TRAAC dont les éléments sont encore en cours de discussion en janvier 2023 (voir section 2.4), l'encadré 3.1 permet d'établir une correspondance entre les deux approches.

Encadré 3.1. Horizon, scénario RCP ou degrés de réchauffement global.

La **Figure 3.2** présente les mêmes informations que la **Figure 3.1** pour le scénario RCP 8.5, mais nous avons replacé sur cette trajectoire les niveaux correspondant aux différents degrés de réchauffement global, de +1.5°C à +4°C, conformément à la Trajectoire d'Adaptation au Changement Climatique (TRACC, voir paragraphe 2.5). On rappelle que cette trajectoire peut paraître un peu optimiste à court terme, au regard des modèles climatiques utilisés dans la présente étude (CMIP5), puisque selon les RCP, +1.5°C puis +2°C seraient plutôt atteints respectivement entre 2022 et 2026, puis 2037 et 2048 (**Figure 2.5**) et non en 2030 puis 2050. La **Figure 3.3** propose justement de positionner les degrés de réchauffement selon leur échéance selon le scénario RCP8.5, illustrant ainsi une trajectoire de réchauffement beaucoup plus rapide que le TRACC.

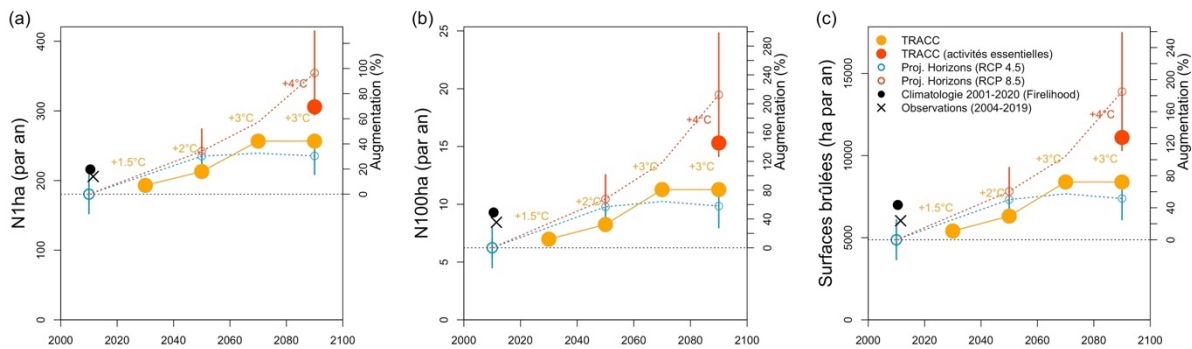


Figure 3.2. Même figure que la figure 3.1, avec les degrés de réchauffement positionnés selon la TRACC.

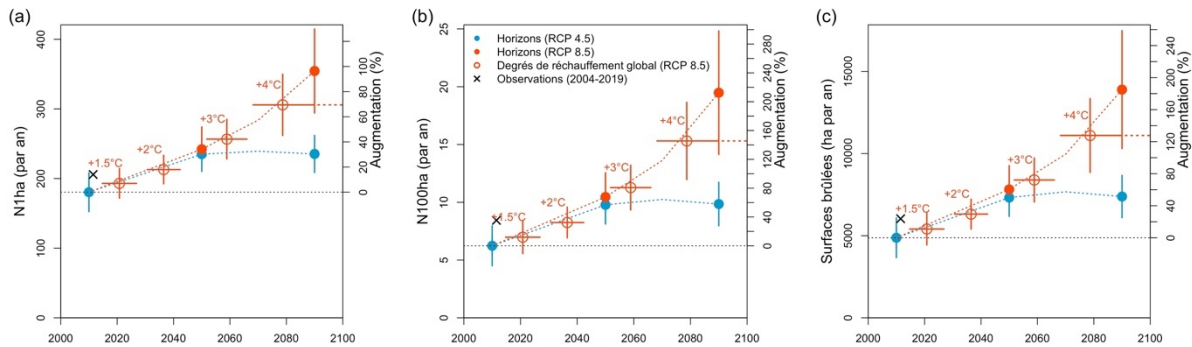


Figure 3.3. Même figure que la figure 3.1, avec les degrés de réchauffement positionnés selon le RCP 8.5.

Évolution de l'activité des feux lors des années extrêmes

Comme expliqué dans la section précédente, les moyennes d'activité des feux sur 20 ans sont peu informatives vis-à-vis des années extrêmes, qui sont en pratique les plus problématiques, notamment pour les services opérationnels. Le formalisme probabiliste et les simulations multiples permettent de calculer des tendances sur ces années extrêmes. Nous avons ici retenu deux métriques, l'une correspondant au retour « décennal », c'est-à-dire la pire saison de feu observée tous les 10 ans et une métrique « extrême » correspondant aux pires activités observées pour les périodes de retour supérieures à 10 ans. Cette dernière métrique dite « des extrêmes²⁰ » présente l'intérêt d'être beaucoup plus stable et donc moins hasardeuse qu'une métrique correspondant à un retour de 30 ans ou plus, qui serait difficile à estimer avec peu de répétitions climatiques dans un régime transitoire.

La **figure 3.4** représente pour le RCP 8.5, les moyennes sur 20 ans en rouge, complétées en violet par le retour à 10 ans et la métrique caractéristique des extrêmes en marron. Bien que légèrement sous estimées en regard des observations sur la période 2001-2020 (encore une fois parce que l'IFM simulé est plus faible que les observations), les métriques « décennal » et « extrême » sont représentatives des observations sur la période historique, la plus grosse des deux étoiles représentant le maximum observé entre 2004 et 2019.

Compte tenu de la variabilité interannuelle très importante de l'activité des feux et du climat, les années extrêmes atteignent des niveaux beaucoup plus élevés que les années moyennes. Sur la période 2001-2020, les N1ha « décennaux » et « extrêmes » sont respectivement de 265 et 317 feux par an, contre 180 pour N1ha « moyen ». De même, les années extrêmes atteignent 18 feux > 100 ha et 15600 ha par an. D'après nos calculs, de tels niveaux ne seront pas atteints en année moyenne, même en 2090 sous RCP 8.5. En revanche, les extrêmes correspondant atteindront en moyenne respectivement 532 feux supérieurs à 1 ha, 40 feux > 100 ha et 31800 ha brûlés à cet horizon.

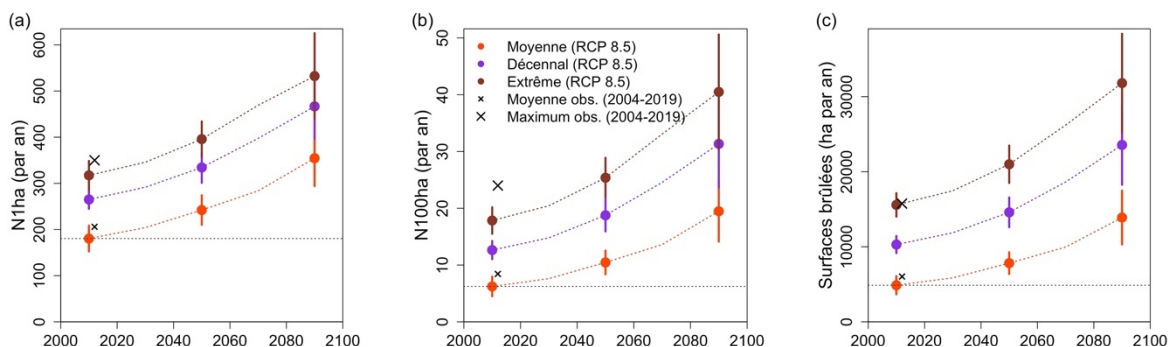


Figure 3.4. Projections de l'activité des feux moyenne (en rouge), décennale (en violet) et extrême (en marron) au 21^{ème} siècle selon le RCP 8.5 pour (a) le nombre de feux qui échappent (> 1 ha), (b) le nombre de grands feux (> 100 ha) et (c) les surfaces brûlées. Les différents horizons correspondent à des moyennes annuelles pour des périodes de 20 ans. Les barres verticales représentent l'écart type lié à l'incertitude entre modèles climatiques (+/- un écart type).

On notera que les augmentations de ces métriques (anomalies) sont plus importantes que celles des moyennes lorsqu'on les exprime en nombres de feux ou en surface. En revanche,

²⁰ Il s'agit de l'Expected Shortfall, qui correspond à l'espérance de l'activité observée pour les années présentant un retour supérieur au retour décennal

l'augmentation relative (exprimée en %) est moins élevée avec par exemple +127% pour les N100ha « extrêmes », alors que les N100ha « moyens » augmentent de +212% en 2090 sous RCP 8.5. En conséquence, le ratio entre « extrêmes » et « moyennes » qui vaut de l'ordre de 2.9 à 3.2 fois le bilan moyen pour les N100 et les surfaces brûlées en période historique, a tendance à décroître vers 2.1-2.3 en fin de siècle sous RCP 8.5. De même, les retours décennaux passeraient de typiquement 2 fois le bilan moyen en termes de nombres de grands feux ou de surfaces brûlées en période historique. Ce ratio se réduirait légèrement au cours du siècle pour tendre vers 1.7. Enfin, on pourra retenir que les futurs nombres de grands feux et surfaces brûlées lors des saisons extrêmes pourraient atteindre 6.5 fois les valeurs moyennes de la période de référence 2001-2020.

Bien sûr, ces résultats supposent que les services opérationnels arrivent à maintenir la même efficacité dans le futur que sur la période 2004-2019 (voir discussion en section 7), puisque l'on extrapole le futur sur la base de la relation feu-climat historique.

D'après ces projections, les surfaces brûlées de l'activité « décennale » correspondent environ au double de l'activité moyenne, alors que les saisons extrêmes correspondent à environ trois fois le bilan moyen. Nous verrons sur ce point au chapitre 4 que la situation est assez différente en zone Sud-Ouest, avec des surfaces brûlées extrêmes correspondant à plus de cinq fois le bilan moyen.

Afin d'illustrer plus concrètement l'écart qu'il peut exister entre une saison de feu extrême et la tendance moyenne en termes de surfaces brûlées, nous présentons en **Fig. 3.5** la variabilité des surfaces brûlées prédite par les 300 simulations de *Firelihood* pour deux modèles climatiques selon le RCP 8.5 (MPI-ESM-LR/REMO2009, qui correspond à un modèle moyen et IPSL-CM5A-MR/RCA4, qui correspond à un modèle prédisant une augmentation de l'activité plus importante). En plus des tendances moyennes, décennale et extrêmes déjà présente **Fig. 3.4**, l'enveloppe orange correspondant aux quantiles 5-95% des surfaces brûlées annuelles simulées, c'est-à-dire à l'intervalle compris entre les 5% de simulations les plus optimistes et les 5% les plus pessimistes. On y voit donc, qu'avec une probabilité non nulle, les bilans peuvent excéder 20000 ha annuel en période historique et qu'il pourrait même atteindre 60000 ha en fin de siècle. Par ailleurs, on note que les années correspondant à des pics météorologiques sont fréquentes.

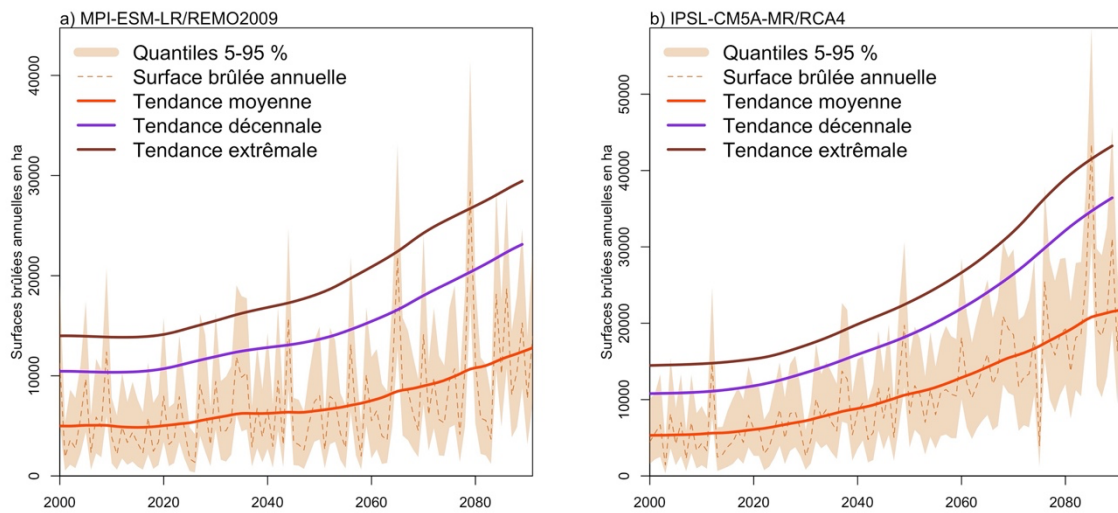


Figure 3.5. Projections de l'activité des feux moyenne (en rouge), décennale (en violet) et extrême (en marron), ainsi que des quantiles des surfaces brûlées potentielles pour chaque année (calculés à partir des quantiles 5% et 95% de 300 simulations de *Firelihood*) au 21^{ème} siècle selon le RCP 8.5, et selon deux modèles contrastés de la sélection DRIAS 2020.

3.2. ***La zone à risque Sud-Est : expansion future et intensification***

Dans cette section, on s'intéresse à la cartographie de l'activité des feux et à son évolution, en particulier l'expansion spatiale et la répartition de la hausse future de l'activité des feux, y compris son intensification dans la zone à risque historique.

Cartographie des surfaces brûlées

La **figure 3.6** présente l'évolution des surfaces brûlées pour les RCP 4.5 et 8.5. La distribution correspondant à la période historique (**Fig. 3.6a**) reproduit plutôt bien les patrons spatiaux réellement observés sur la période 2004-2019 (en bas à gauche de **Fig. 3.6**), bien qu'il s'agisse de climat potentiel, même si les observations sont bien sûr beaucoup moins lissées dans l'espace que la moyenne des 300 simulations *Firelihood*. Sous l'effet du changement climatique, les surfaces brûlées augmentent partout, mais de manières plutôt plus marquées dans les endroits où les surfaces brûlées sont déjà importantes.

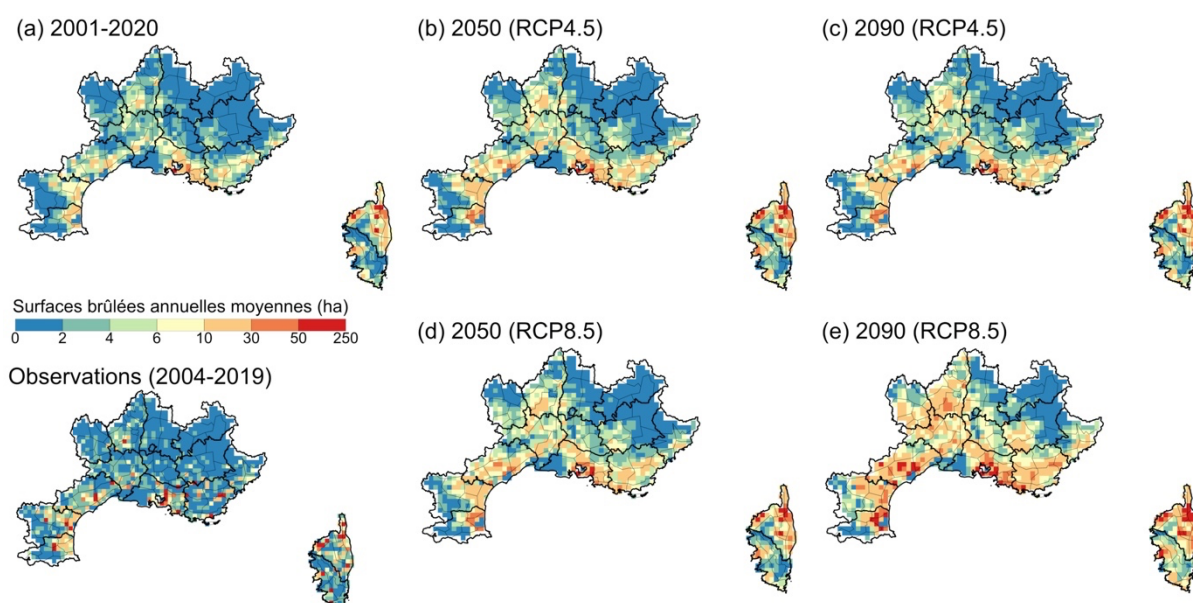


Figure 3.6. Surfaces brûlées annuelles moyennes (en ha par pixel de 8 km de côté), selon les projections climatiques du modèle *Firelihood* pour la période historique (**a**) et les horizons 2050 et 2090 sous scénario RCP 4.5 (**b et c**) et RCP 8.5 (**d et e**). A titre de référence, les observations issues de la base de données Prométhée pour la période 2004-2019 sont présentées en bas à gauche. Les délimitations en traits noirs épais correspondent aux limites des départements, alors que les traits fins correspondent au sous-découpage des zones météorologiques « feux de forêt » définies par Météo-France.

Des cartes similaires peuvent être produites pour les nombres de feux (N1ha ou N100ha). Afin de conduire des analyses plus synthétiques, nous produisons à la section qui suit une analyse multi-métrique fondée sur 5 niveaux d'activités.

Cartographie fine du niveau d'activité des feux et expansion de la zone à risque

Nous avons classé les pixels SAFRAN (de 8 km) de la zone Prométhée selon 5 niveaux de risque (qualifiés de faible à extrême) prenant en compte les valeurs annuelles de N1ha,

N100ha et Surfaces brûlées calculés par *Firelihood* pour les différents pixels de la zone Prométhée et pour les horizons 2001-2020, 2050 et 2090, à l'aide d'une méthode de partitionnement de données appelée *k-moyennes*. Cette méthode permet de définir objectivement des groupes ou classes homogènes d'activité des feux (ici k=5 groupes) selon une échelle permettant de suivre l'évolution du niveau d'activité en zone Prométhée tout au long du 21^{ème} siècle.

Si l'on applique cette classification à la période de référence (**Fig. 3.7a**), on observe que l'essentiel de la zone (73%) correspond à un niveau d'activité de la catégorie dite faible, le reste (27%) étant à risque modéré à extrême. Dans la suite de cette section, *on appellera* « zone à risque » les portions du territoire présentant un risque au moins modéré. Cette zone à risque constitue une représentation plutôt fidèle des zones présentant les surfaces brûlées les plus importantes pendant la période 2004-2019. On notera en particulier que la classe à niveau « faible » présente une activité très largement inférieure à celle de la classe modérée pour les 3 métriques (ratio de l'ordre de 4), alors que les transitions entre les autres classes se traduisent par des ratios de l'ordre de 2 (voir **Table de la Fig. 3.7** en bas à gauche). Ceci illustre le fait que les activités de feu dans les zones « faibles » sont notablement plus basses que dans le reste de la zone Prométhée, confortant ainsi notre définition de la zone à risque pour les différents horizons.

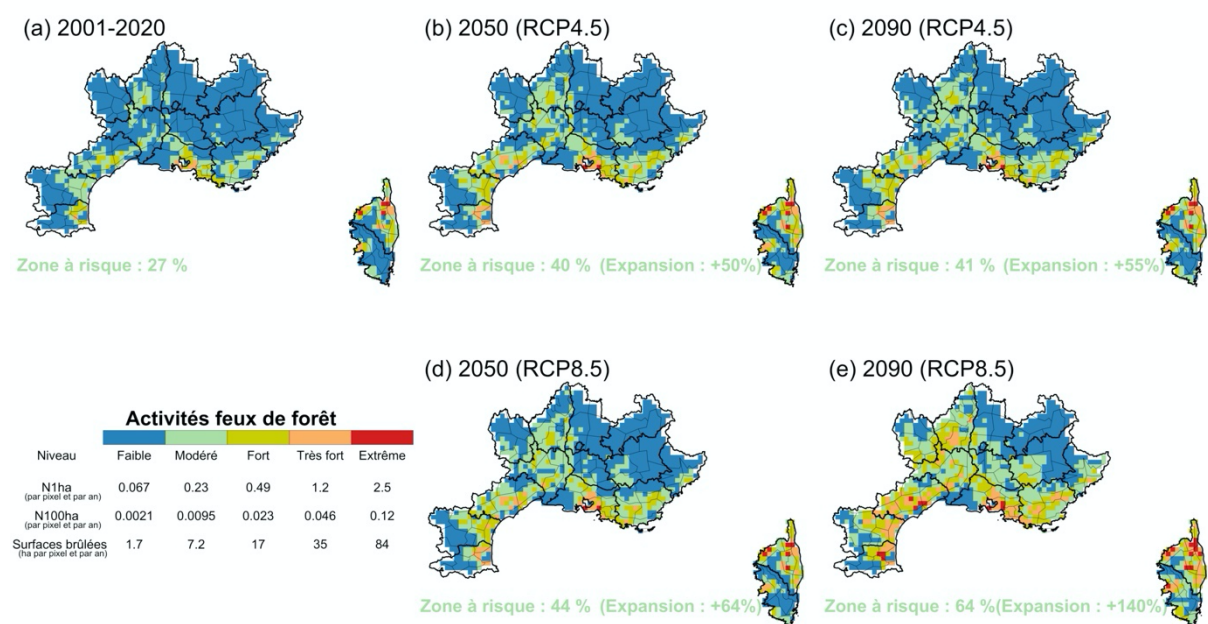


Figure 3.7. Cartographie du niveau d'activité feux de forêt déterminée à partir d'une classification en 5 niveaux. Les métriques d'activités annuelles médianes correspondant aux différents niveaux sont rapportées en dessous de l'échelle de couleurs présentant les 5 niveaux. Le pourcentage correspondant à la zone à risque pour chaque horizon et scénario correspond au pourcentage de pixel présentant un risque au moins modéré, l'expansion de cette zone étant calculée par rapport à la référence 2001-2020. Les délimitations en traits noirs épais correspondent aux départements, alors que les traits fins correspondent aux sous-découpages des zones météo « feux de forêt ».

Cette zone à risque s'étend progressivement pour atteindre 40-44% du territoire quel que soit le scénario en 2050, soit une expansion spatiale comprise entre +48 et +62% (**Fig. 3.7b**

et d). L'horizon 2090 dépend fortement du choix de scénario, le RCP 8.5 conduisant à une zone à risque couvrant 64% du territoire, soit une expansion de près de 140% (**Fig. 3.7e**). L'expansion la plus marquée se situe dans l'Ouest du bassin, tous les départements basculant quasi intégralement en zone à risque, ainsi que dans les Préalpes du sud ; en revanche la partie alpine demeure plus épargnée. Une carte synthétique représentant cette expansion sous RCP 8.5 est présentée en **Figure 3.8**.

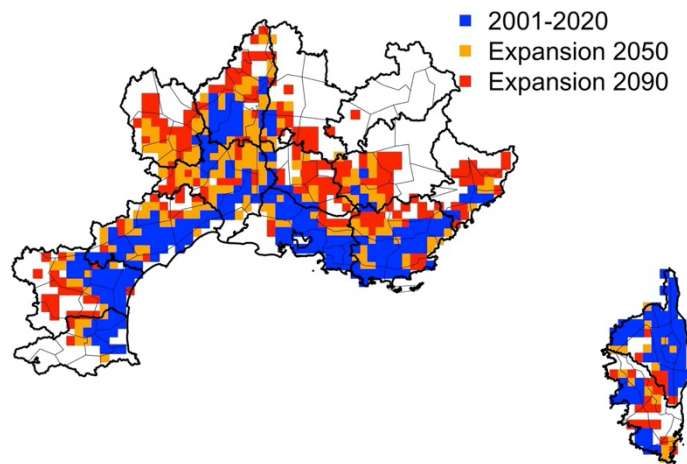


Figure 3.8. Cartographie de l'expansion de la zone à risque (présentant un risque au moins modéré) sous RCP 8.5. La même figure pour le RCP 4.5 se trouve en **Annexe C (Fig. C.1)**

Ces zones d'expansion, qui présentent encore actuellement une activité limitée, vont concerner des populations et des territoires dans lesquels la culture du risque et la politique de prévention sont moins développées. Elles concernent également des écosystèmes sensiblement différents, potentiellement plus vulnérables. D'autres analyses sont possibles à partir de ces cartes, notamment des calculs de distances ou de vitesse d'expansion dans différentes directions sur le territoire ou selon des gradients altitudinaux, afin d'identifier les zones où les changements seront les plus rapides, mais n'ont pas été menés à ce stade de l'étude, faute de temps.

Pour connaître la distribution précise de l'évolution du taux d'occupation des différents niveaux, on peut consulter la **Figure 3.9**. On y voit en particulier que le pourcentage de la zone à risque extrême passerait de 0.35 % à 1.8 % du territoire en 2090 sous RCP 8.5 et de 7 à 32 % pour le risque fort ou supérieur, suggérant une forte intensification de l'activité dans la zone à risque historique.

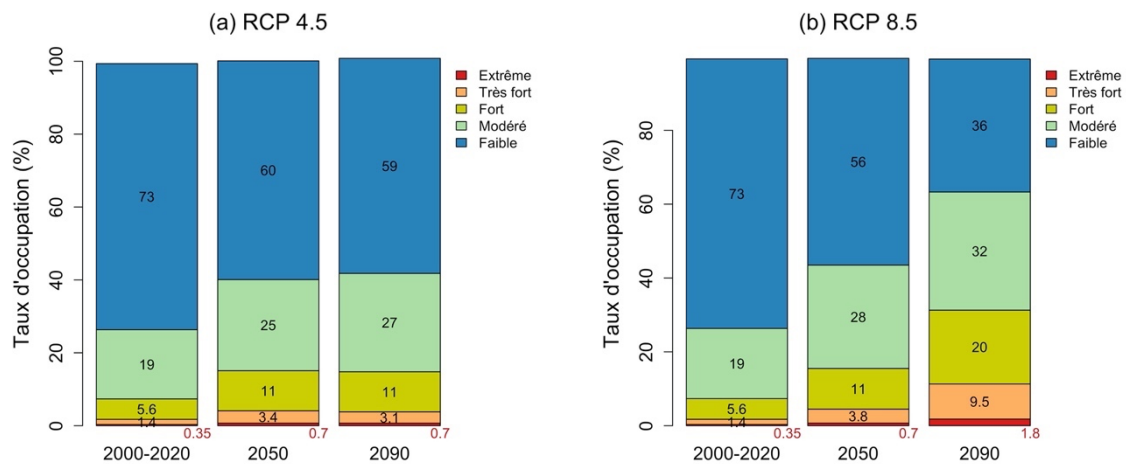


Figure 3.9. Distribution des différents niveaux de risque des pixels de 8 km de côté et de leur évolution à différents horizons, pour les scénarios 4.5 et 8.5. Le taux d'occupation indique le pourcentage de pixels de la zone Prométhée couverts par les différents niveaux.

Cartographie du niveau d'activité des feux à l'échelle des zones météorologiques « feux de forêt »

L'échelle des pixels SAFRAN est très fine pour une analyse globale de l'expansion et de l'intensification, ce qui incite à agréger les analyses à une échelle plus grossière. Les zones météorologiques « feux de forêt » correspondent à des sous-découpages des départements administratifs en 6 à 9 zones présentant des conditions climatiques similaires vis-à-vis des feux de forêt. Leur numérotation utilise le numéro de département²¹ comme préfixe et l'indice de la sous-zone en suffixe. Grâce au caractère additif des métriques de l'activité des feux, on peut calculer la valeur moyenne des N1ha, N100ha et surfaces brûlées pour l'ensemble des pixels de chaque zone météorologique « feux de forêt », ce qui permet de classer ces zones selon la même échelle de risque que celle définie précédemment (niveaux d'activité de la **fig. 3.7**). On observe que la plupart des zones feux de forêt basculent progressivement vers le niveau supérieur, traduisant de manière synthétique à la fois l'expansion et l'intensification.

²¹ Sauf Corse du Sud et Haute Corse, qui utilisent respectivement les préfixes 20 et 21

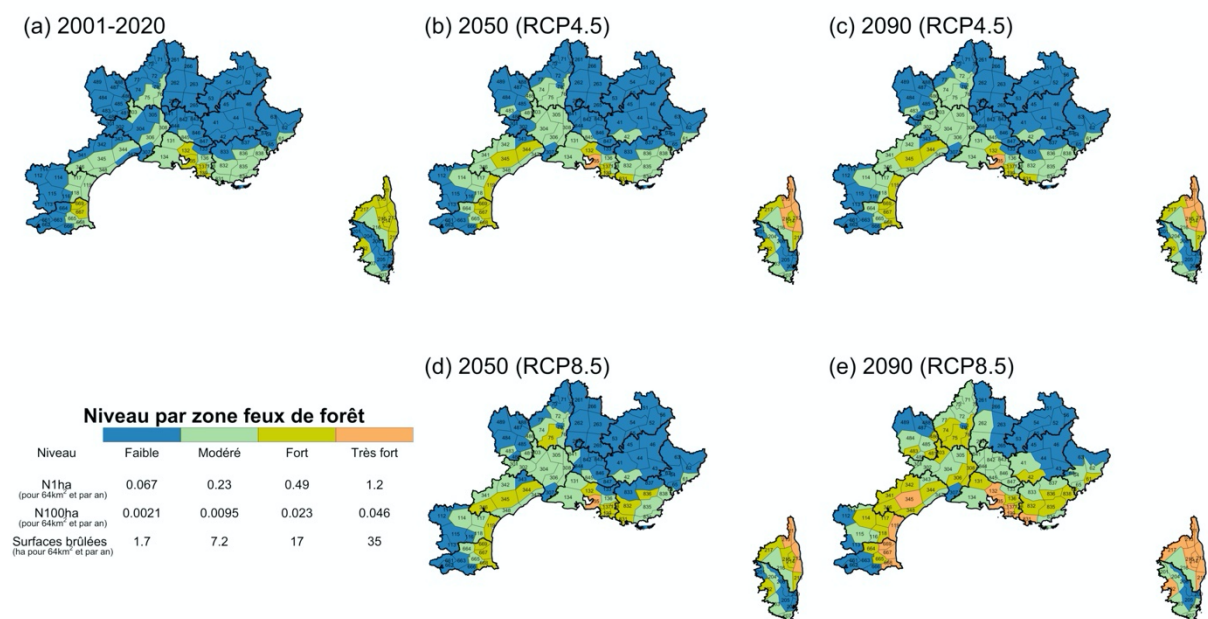


Figure 3.10. Cartographie du niveau d'activité des feux des différentes zones météorologiques « feux de forêt » définies par Météo-France. Les métriques N1ha, N100ha et Surfaces Brûlées correspondantes correspondent à des densités d'activité pour une surface de référence de 64 km² (taille du pixel SAFRAN)²² et par an.

En comparant les cartes des **Figures 3.7 et 3.10**, on observe que l'activité est plutôt homogène au niveau de chaque zone, de sorte que les cartes de la **Figure 3.10** constituent une bonne synthèse de l'information, adaptée aux besoins opérationnels. On notera cependant qu'il existe quelques zones « feux de forêt » assez hétérogènes. Par exemple, la zone 134 (Sud-Ouest des Bouches du Rhône) présente une activité modérée au grain « zone feu de forêt » dès la période historique sur la **Figure 3.7**, en raison d'une activité des feux marquée sur la frange la plus orientale de la zone, alors que la majeure partie de celle-ci présente un risque faible (territoires de la Crau et de la Camargue). A l'inverse, les zones 42, 64 et 65 (Sud-Ouest des Alpes-de-Haute-Provence et des Alpes-Maritimes) apparaissent en risque faible en période historique, malgré une activité de niveau modéré sur une partie importante de ces pixels. Enfin, les « hots spots » correspondant au niveau « extrême » à l'échelle de 8 km se fondent dans la classe de niveau « très fort » à l'échelle des zones météorologiques feux de forêt, car même en 2090 et sous RCP 8.5, aucune zone météorologique ne présente une activité suffisante sur l'ensemble de ses pixels pour atteindre un niveau global « extrême » selon la classification par pixel de la **Figure 3.7**.

Répartition des hausses de l'activité des feux entre la zone à risque historique et le reste de la zone Prométhée

On s'intéresse ici à la répartition de la hausse d'activité des feux induite par le changement climatique (c'est-à-dire l'anomalie par rapport à 2001-2020) selon que l'on se trouve ou non dans la zone à risque historique, c'est-à-dire la zone à risque au moins modéré de la période 2001-2020 (zone bleue de la **Fig. 3.7**).

²² Afin que la valeur de la métrique soit indépendante de la taille de la zone « feux de forêt », celles-ci ayant des tailles assez variables

Ces anomalies sont présentées en **Figure 3.11** pour les N100ha, avec entre 4 et 13 grands feux supplémentaires à attendre en moyenne du fait du changement climatique selon les horizons. Entre 65 et 71 % des grands feux additionnels - soit environ les deux tiers de l'anomalie - seraient liés à une hausse de l'activité dans la zone à risque historique. Une répartition spatiale similaire est obtenue pour les autres métriques de l'activité (voir **Annexe C Figures C.2 et C.3** pour les anomalies de N1ha et les surfaces brûlées). En conséquence, l'augmentation globale de l'activité sera liée en premier lieu à une intensification au sein de la zone à risque historique, malgré la vaste expansion de la zone à risque décrite au paragraphe précédent. Cette intensification aura des conséquences importantes en ce qui concerne les écosystèmes et l'adaptation de la politique de prévention et de lutte, qui seront abordées dans les sections 3.4 et 3.6.

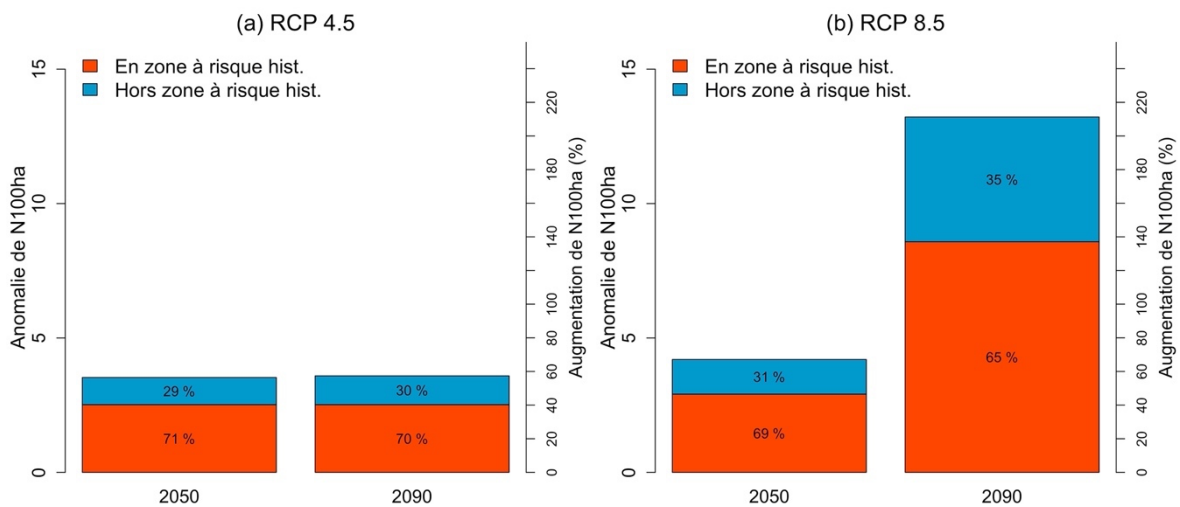


Figure 3.11. Anomalies de N100ha sous l'effet du changement climatique, distribuées par rapport à la zone à risque historique (2001-2020) en rouge ou dans la zone présentant un risque historiquement faible en bleu, pour les scénarios : **(a)** 4.5 et **(b)** 8.5.

3.3. Allongement et intensification de la saison estivale de feu

Dans cette section, on s'intéresse à l'allongement de la saison de feu dite estivale et à la répartition de l'activité future des feux au cours de la saison en zone Sud-Est.

Saisonnalité de l'activité des feux estivaux et son évolution

La **Figure 3.12** présente la saisonnalité moyenne des trois métriques N1ha, N100ha et Surfaces brûlées, qui présentent un pic d'activité début août (en bleu). Cette saisonnalité historique moyenne²³ reflète bien l'activité observée sur la période 2004-2019 (filtrée afin de lisser la variabilité des observations) ou la climatologie observée sur 2001-2020 simulée avec *Firelihood*, même si on retrouve la sous-estimation des activités projetées entre 2001-2020 (sous-estimation de l'IFM, cf. **Fig. 2.1**).

Les projections futures montrent une intensification tout au long de la saison, avec un léger décalage du pic d'activité vers le début de saison (fin juillet en fin de période). Cette augmentation généralisée de l'activité, va conduire au fait que les niveaux d'activité correspondant à l'actuel cœur de saison estivale seront atteints beaucoup plus précocement et se maintiendront plus tardivement, induisant ainsi un allongement de la saison opérationnelle. De plus, le cœur de saison va se traduire par des niveaux d'activités encore jamais observés. Nous caractérisons cet allongement et cette intensification dans les sous-sections qui suivent.

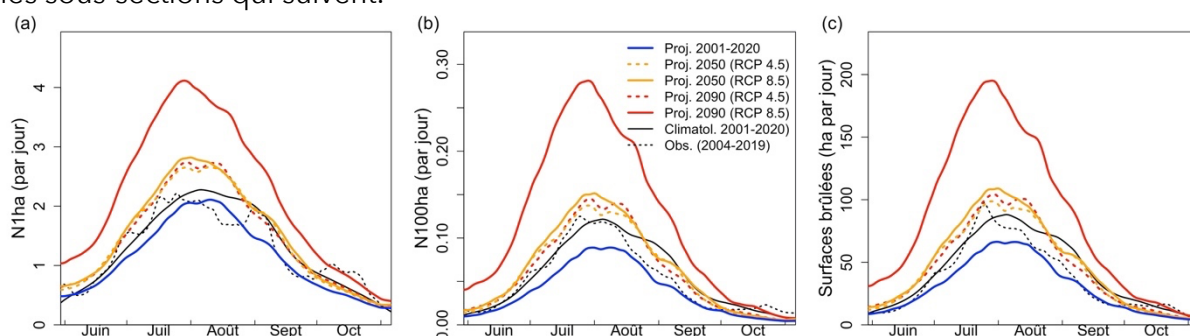


Figure 3.12. Activités saisonnières moyennes des feux pour différents horizons et scénarios pour (a) N1ha, (b) N100ha et (c) Surfaces brûlées. En noir, figurent les observations qui ont été filtrées avec un lissage à 7 jours pour les N1ha et 30 jours sur les N100ha et Surfaces brûlées afin de gommer la variabilité très forte présente dans les observations Prométhée entre 2004 et 2019.

Allongement de la saison estivale de feu

Comme nous l'avons fait pour classer les pixels de la zone Prométhée selon leur activité de feu (section 3), nous avons ici appliqué aux trois métriques de l'activité journalière la même technique de *k-moyennes* à 5 niveaux pour classer les jours de la saison estivale selon leur activité de feu à l'échelle de la zone Prométhée. Les résultats de cette classification sont présentés **Figure 3.13** pour le RCP 8.5 (et en **Annexe C Figure C.4** pour le RCP 4.5).

Il en résulte que seulement 3 niveaux (faible à fort) sont observés dans la période de référence historique (2001-2020), les niveaux très forts et extrêmes émergeant respectivement en 2050 et 2090 sous RCP 8.5. En période historique, le risque « au moins modéré » s'étend du 27 juin au 13 septembre et correspond à peu près à la mise en place du dispositif de surveillance partielle, avec des variations selon les années et les départements. Elle peut donc être considérée comme représentative de la « saison de feu ». Le risque fort s'étend du 18 juillet au 22 août et correspond à un dispositif pleinement

²³ Sur 300 simulations *Firelihood* et les différents modèles climatiques

opérationnel (typiquement de mi-juillet à mi-août). Elle peut donc être considérée comme représentative du « cœur de la saison de feu ».

La longueur de la saison de feu passerait donc de 79 jours à 100 puis 127 jours sous RCP 8.5, alors que le cœur de saison passerait de 36 à 92 jours en fin de siècle. On notera que cet allongement est quasi-symétrique entre le début et la fin de saison, même s'il est légèrement plus précoce que tardif. Une telle symétrie n'est pas triviale, car beaucoup de régions du monde présenteront un faible allongement en fin de saison, du fait de l'arrivée de précipitations de type mousson dont la date ne devrait pas être considérablement modifiée par le changement climatique (Barbero et al. 2015 ; Dong et al. 2022).

Ces allongements de saison de feu sont susceptibles d'induire fatigue accrue des personnels et usure prématurée des matériels impliqués, et vont nécessiter une adaptation des dispositifs opérationnels.

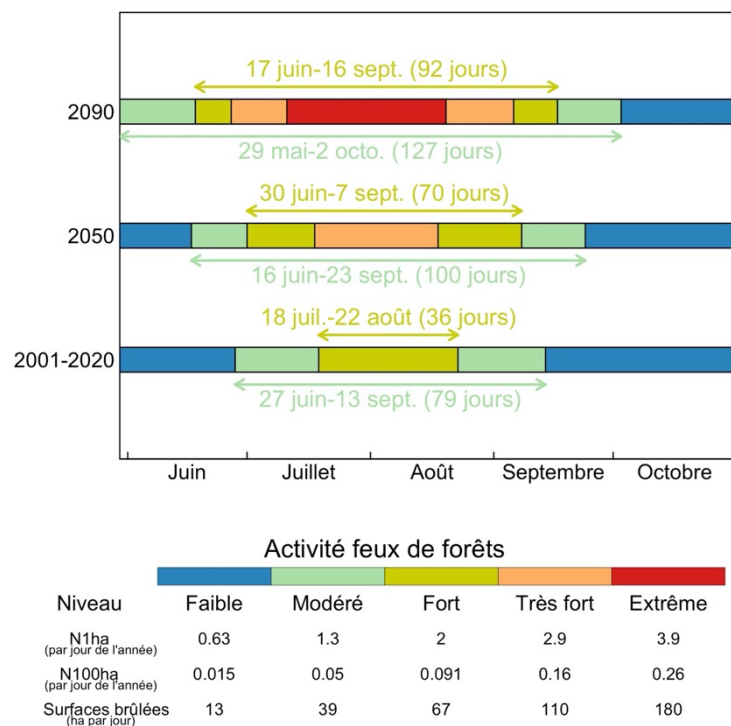


Figure 3.13. Évolution du niveau d'activité des feux journaliers selon le RCP 8.5 (même figure pour le RCP 4.5 disponible en Annexe C). Les périodes correspondant à un niveau au moins modéré et au moins fort s'allongent aux horizons 2050 et 2090.

Pour connaître la répartition précise de l'évolution en nombre de jours des différents niveaux, on peut consulter la **Figure 3.14**. On y voit en particulier que 41 jours seront à risque extrême en moyenne en 2090 sous RCP 8.5, suggérant une très forte intensification de l'activité au cœur de la saison.

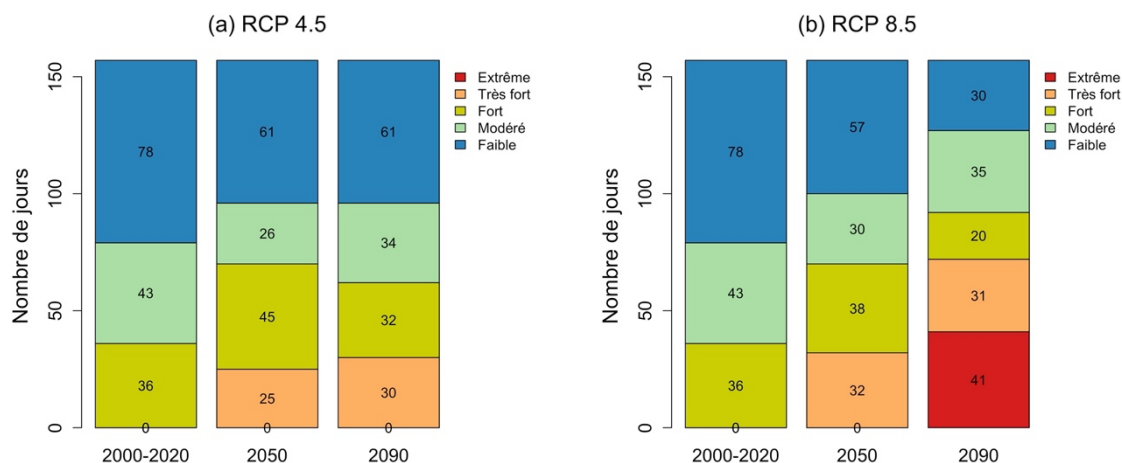


Figure 3.14. Distribution des différents niveaux de risque journaliers et de leur évolution à différents horizons, pour les scénarios 4.5 et 8.5. Il s'agit du nombre de jours de la période « estivale » (27 mai-5 novembre) à un niveau donné.

Répartition des hausses de l'activité des feux entre le cœur et le reste de la saison de feu

On s'intéresse ici à la répartition de la hausse de l'activité des feux induite par le changement climatique (c'est-à-dire l'anomalie par rapport à 2001-2020) selon que l'on se trouve ou non dans le cœur de la saison historique, c'est-à-dire du 18 juillet au 22 août (voir **Fig. 3.13**).

Ces anomalies sont présentées en **Figure 3.15** pour les N100ha. Environ la moitié des hausses d'activité induites par le changement climatique se dérouleront pendant cette période de 40 jours, les résultats étant sensiblement similaires pour les autres métriques (voir **Annexe C Figures C.5 et C.6**). En conséquence, l'augmentation de l'activité sera liée à parts égales à une intensification au cœur de la saison de feu et à l'allongement de cette saison, avec des conséquences importantes pour l'adaptation de la politique de prévention et de lutte, abordée dans la section 3.5.

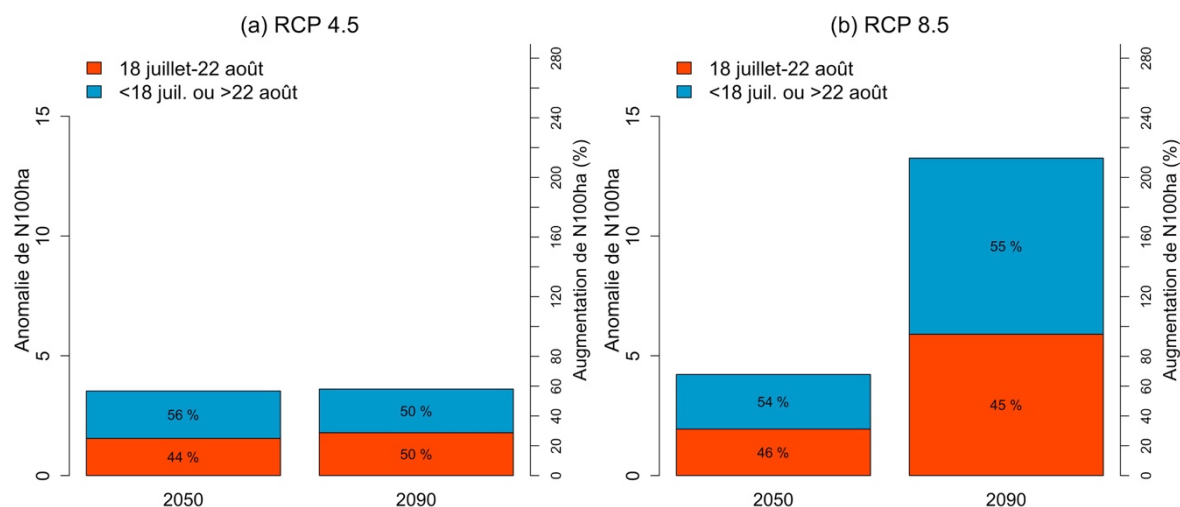


Figure 3.15. Anomalies de N100ha sous l'effet du changement climatique, distribuées par rapport à la zone à risque historique (2001-2020) en rouge, pour les scénarios 4.5 et 8.5.

3.4. ***Impact sur la végétation***

Au-delà des différentes analyses présentées jusqu'ici, les projections de l'activité des feux peuvent être utilisées pour caractériser l'évolution de la période de rotation des feux, une variable clé de la pression des régimes de feux sur les écosystèmes.

De plus, en croisant les données d'activités de feu futures avec des caractéristiques des écosystèmes, on peut affiner les impacts attendus sur le milieu naturel, dont les caractéristiques dans la zone d'expansion diffèrent fortement de celles de la zone historique en termes de vulnérabilité (Dupire et al. 2019). Cette partie pourrait donc être enrichie en fonction des enjeux identifiés et des données disponibles, notamment à l'ONF et à l'IGN.

Diminution de la période de rotation des feux

La période de rotation des feux est une métrique des régimes de feux utilisée pour caractériser l'impact de la fréquence des feux sur un écosystème donné. Il s'agit du temps nécessaire au feu pour brûler l'équivalent de la surface forestière d'une zone donnée. Bien sûr, certaines parties de la zone pourront brûler plusieurs fois, alors que d'autres demeureront épargnées.

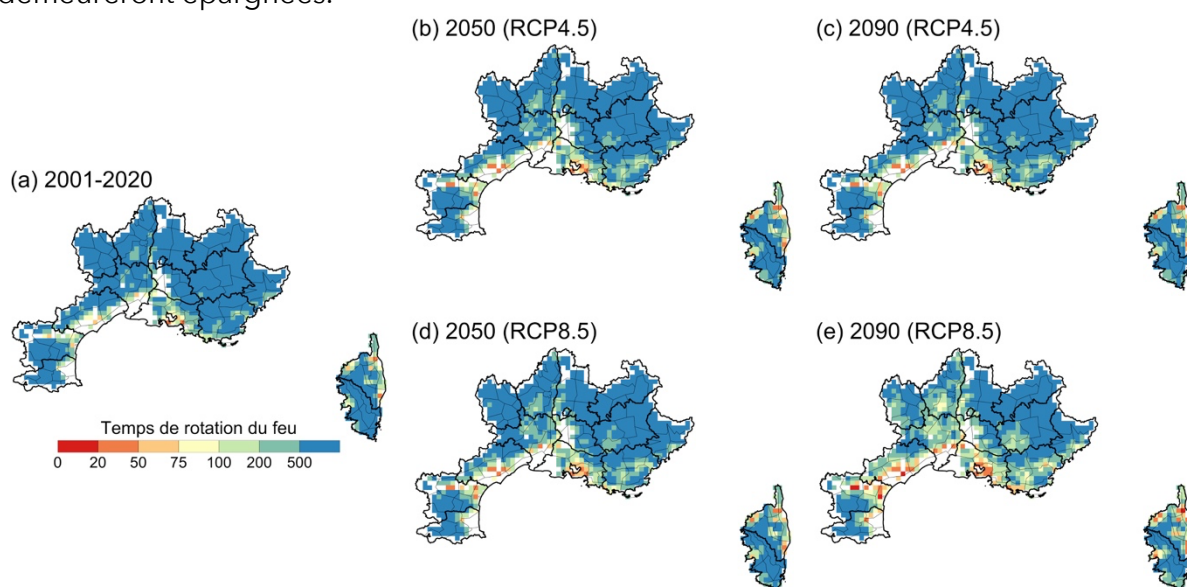


Figure 3.16. Évolution de la période de rotation des feux. Il s'agit de la durée (en années) nécessaire pour que les feux d'un pixel donné brûlent l'équivalent de la surface boisée totale du pixel en question. Les pixels en blanc ne sont pas renseignés, car ils concernent des territoires couverts par moins de 10 % de forêt, ce qui rend le calcul de la période de rotation peu fiable.

La **Figure 3.16** montre les projections de périodes de rotation aux différents horizons, calculées à l'échelle des pixels de 8 km. Une partie non négligeable du territoire sera concernée par des périodes de rotation inférieures à 50 ans, voire 25 ans, toutefois située dans la zone à risque historique qui accueille une végétation typiquement méditerranéenne, c'est-à-dire généralement dotée de caractères d'adaptation au feu. Les feux parcourant préférentiellement certaines zones au sein d'un pixel de 8 km, une période de rotation de 50 ans peut se traduire par le passage de plusieurs feux sur les mêmes sites au cours de cette période. Ainsi, des périodes de rotation de 50 ans ou moins devraient induire une baisse de résilience de la végétation du fait des contraintes biologiques liées à la régénération naturelle des peuplements arborés, malgré les adaptations des espèces

méditerranéennes, aggravée par une possible dégradation des sols et des sécheresses plus intenses et plus fréquentes suivant le passage des incendies. On observerait alors une « matorralisation » des territoires concernés, c'est-à-dire une régression de la strate forestière au profit de formations arbustives de type garrigue ou maquis sur de grandes étendues spatiales comme on peut déjà le constater dans le Sud-Ouest des Bouches-du-Rhône.

Dans les territoires montagneux, qui accueillent une végétation moins adaptée au feu, les périodes de rotation restent longues, généralement supérieures à 500 ans, à l'exception de la frange sud-est du massif central (Haut-Languedoc, Cévennes et Monts d'Ardèche) qui pourra connaître en scénario RCP8.5 des périodes de rotation de l'ordre de 200 ans. Si ces forêts de montagne pourront connaître des difficultés de régénération post-incendie, la végétation à l'échelle du paysage ne devrait connaître des changements du fait des incendies que sur le très long terme du fait de l'amplitude des périodes de rotation des incendies.

Cartographie des impacts

En croisant la proportion de surface brûlée attendue avec des cartes de la ressource forestière ou de la sensibilité de la végétation au feu, on peut moyennant des hypothèses sur la sévérité des feux (par ex. Rivière et al. 2022) (i) déduire des cartes convertissant le pourcentage de surface forestière brûlée en termes de perte de ressources forestières (en t/ha ou en m³ de bois), moyennant des hypothèses sur la sévérité des feux ; (ii) réaliser des analyses comparant les caractéristiques de la ressource dans la zone à risque et en dehors. De tels travaux n'ont pas été menés dans le cadre de la présente étude faute de temps, mais il conviendrait d'échanger avec l'ONF et l'IGN afin de déterminer les sources de données les plus pertinentes, ce qui pourra être mené dans le cadre d'un futur projet du réseau mixte technologique AFORCE sur la vulnérabilité des forêts au changement climatique, plus spécifiquement lié à ces questions.

3.5. ***Impact sur les dispositifs de prévention et de lutte***

Les projections peuvent être utilisées pour caractériser l'expansion, l'allongement et l'intensification des activités de feux, mais aussi d'autres caractéristiques spécifiques susceptibles d'influencer la lutte. Nous avons en particulier identifié la concomitance des événements de feu, ainsi que la proportion de grands feux, que nous quantifions ici.

De plus, en croisant les données d'activité future des feux avec des caractéristiques des services opérationnels, il devrait être possible de mieux planifier les besoins futurs. Cette partie pourra donc être enrichie en fonction des enjeux identifiés par les services concernés et des données disponibles. Il conviendra cependant d'intégrer aux analyses que les évolutions de l'activité projetée le sont compte tenu de l'action des services actuellement en place et supposent qu'ils maintiendront leur efficacité dans le futur (voir discussion au chapitre 5).

Tendance sur les tailles de feux

On compare les augmentations prédites sous RCP 8.5 pour différentes tailles de feu de 1 à 1000 ha et par rapport à l'IFM moyen estival (**Figure 3.17**). N100ha est la métrique qui augmente le plus, davantage que les très grands feux (N1000ha) ou les surfaces brûlées. Ce résultat peut sembler surprenant au premier abord, mais pourrait s'expliquer par le fait que des facteurs du paysage comme la continuité du combustible ou des barrières naturelles peu ou pas combustibles (mer Méditerranée, étangs, zones urbaines ou ripisylves) induisent une limite physique au développement de très grands feux, contraignant davantage leur potentiel à dépasser 1000 ha que 100 ha sous danger accru. Cette contrainte pourrait cependant diminuer dans le futur, avec l'accroissement des zones de déprise (Abadie et al. 2018), voire les restrictions d'arrosage et d'irrigation qui pourraient accroître la continuité des zones combustibles.

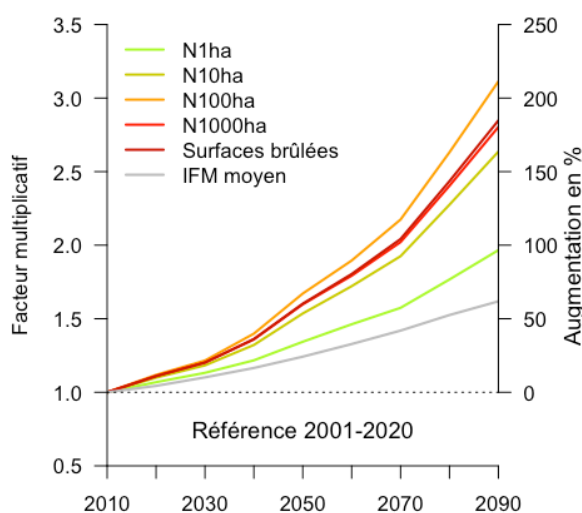


Figure 3.17. Évolution des feux selon leur taille sous RCP 8.5.

Ces augmentations des nombres de feu par catégorie de taille vont se traduire par une augmentation de la taille du feu moyen de 27 à 39 ha, mais aussi de la proportion de feux dépassant 100 ha, de 3.5 à 5.6 % à horizon 2090 sous RCP 8.5 (voir **Table 3.1**).

Table 3.1. Évolution des caractéristiques du feu moyen et de la proportion de grands feux (parmi les feux supérieurs à 1 ha)

	2001-2020	2050 RCP 4.5	2090 RCP 4.5	2050 RCP 8.5	2090 RCP 8.5
Taille du feu moyen (ha)	27	31	31	32	39
Pourcentage de feux supérieurs à 100 ha	3.5	4.2	4.2	4.3	5.5

Concomitance d'évènements de feux

Les évènements simultanés posent des problèmes de dispersion des moyens pouvant aboutir à l'échec de l'attaque sur feux naissants. On s'intéresse donc à l'évolution de la concomitance de feux supérieurs à 1 ha. Nous avons choisi trois seuils à savoir 7, 10 et 15 feux de plus de 1 ha lors la même journée (**Figure 3.18**), le seuil de 7 feux quotidiens ayant été indiqué par l'Agence DFCI de l'ONF comme un seuil déjà critique du point de vue opérationnel.

Le seuil de 7 feux par jour est dépassé environ 1.8 jours par an en moyenne en période historique et serait atteint 10 jours par an en fin de siècle sous RCP 8.5. Le nombre de N1ha supérieur à 10 passerait de 1 jour tous les 3.5 ans (0.28 par an) à plus de 2.5 par an. Enfin, le seuil de N1ha supérieur à 15 (jamais observé sur la période 2004-2020) passerait de 1 jour tous les 100 ans, à presque 1 jour tous les quatre ans. Ces dépassements de seuils sont particulièrement inquiétants, car ils illustrent des situations dans lesquelles les forces de lutte devront être redimensionnées pour permettre davantage de déploiements simultanés. Si ces redimensionnements ne peuvent être réalisés, l'efficacité de la lutte peut fortement diminuer et les situations de dépassement des capacités de lutte se multiplier au profit des grands feux.

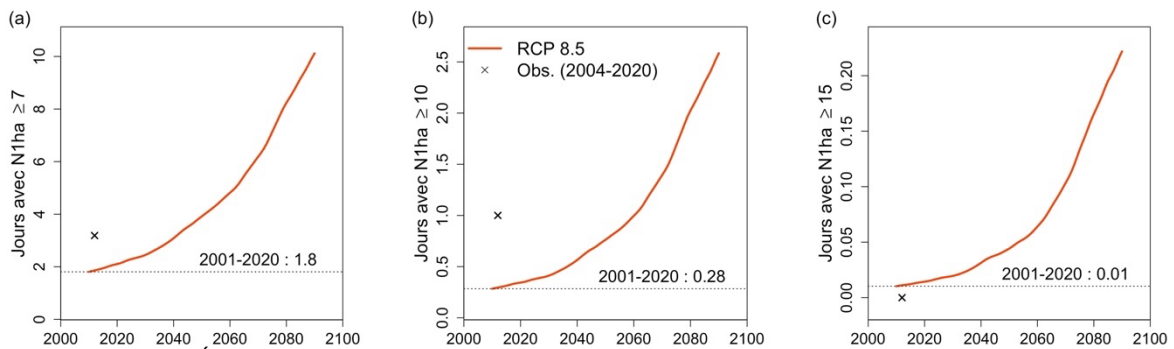


Figure 3.18. Évolution de la concomitance des feux supérieurs à 1 ha sous RCP 8.5. Il s'agit du nombre de jours de l'année en moyenne présentant un nombre de feux de plus de 1 ha supérieurs à **(a)** 7, **(b)** 10 et **(c)** 15.

3.6. Synthèse des analyses en zone Sud-Est

L'ensemble des projections pour la zone Sud-Est montrent une augmentation de l'activité moyenne des feux déjà marquée dès 2030 par rapport à la période historique 2001-2020, quel que soit le scénario, de +13 à +22 % selon les métriques. Le phénomène s'accroîtra jusqu'en 2050 (de +34 à +67 %). Au-delà de 2050, l'augmentation se stabilise dans le cas du RCP 4.5, alors qu'elle continue de progresser de manière exponentielle sous RCP 8.5, atteignant de +97 à +212 % en fin de siècle. Le nombre de grands feux (> 100 ha) est la métrique qui augmente le plus rapidement. On pourrait ainsi atteindre près de 20 feux de plus de 100 ha par an en moyenne, contre moins de 7 en période de référence (**Fig. 3.1**). On peut également estimer l'évolution de ces métriques lors des années extrêmes qui se produisent moins d'une fois par décennie, mais qui concentrent la majorité des dommages. On retrouve les mêmes patrons pour ces extrêmes que pour les tendances moyennes, même si les augmentations relatives sont moins importantes. Par exemple, les nombres de grands feux passeraient de 18 à 40 feux par an lors de ces années extrêmes, soit une augmentation de +122 %, contre +212 % pour les moyennes annuelles (**Fig. 3.4**). En termes de surfaces brûlées, le niveau de retour décennal correspond à environ deux fois le bilan moyen annuel, alors que les années extrêmes correspondent à trois fois le bilan moyen, ce ratio se maintenant au cours du siècle.

Les projections moyennes peuvent être spatialisées sous forme de cartes permettant de localiser la zone à risque principale et de quantifier l'intensification à l'intérieur de cette zone, ainsi que son expansion. Ces cartes sont calculées sur la grille SAFRAN de 8 km ou pour des zones météorologiques « feux de forêt », qui correspondent à un sous-découpage des départements administratifs présentant des conditions feu-météo homogènes. La zone à risque, qui s'étend en période historique sur 27 % de la zone Sud-Est, atteindrait 40-44 % en 2050, puis 64 % en fin de siècle en RCP 8.5, soit une augmentation de 140 % (**Fig. 3.7**). Les territoires basculant dans la zone à risque principale se situeraient en particulier dans la partie Nord-Ouest de la zone et dans l'arrière-pays provençal (**Fig. 3.8**). Même si ces expansions sont très importantes, il convient de garder en tête que l'intensification va être plus forte dans la zone à risque historique, que dans ces territoires nouvellement concernés par les feux. Ainsi, environ deux tiers des hausses d'activité des feux induites par le changement climatique vont avoir lieu dans la zone à risque historique (**Fig. 3.11**). Une telle intensification va induire de plus grandes sollicitations des services opérationnels, qui auront davantage d'interventions concomitantes. Par exemple, le nombre de journées présentant plus de 7 feux supérieurs à 1 ha passerait en moyenne de 1.8 à 10 par an, multipliant les risques d'échec de l'attaque sur feux naissants compte tenu de la dispersion des moyens. En conséquence, ce phénomène pourrait ainsi amplifier l'accroissement de la fréquence des feux « qui échappent » induite par le changement climatique. Les interventions moyennes seront également plus importantes, la proportion de grands feux (supérieur à 100 ha) parmi les feux ayant échappé (supérieur à 1 ha) passant de 3.5 à 5.5 % (**Fig. 3.18** et **Table 3.1**).

L'augmentation du niveau de danger va aussi se traduire par un allongement de la période d'activité des feux au cours de la saison avec un début plus précoce et une fin plus tardive (**Fig. 3.13**). La saison de feu modérée passerait en moyenne de 79 jours (27 juin-13 septembre) à 100 jours en 2050 (16 juin-23 septembre), puis à 127 jours en 2090 sous RCP 8.5 (29 mai-2 octobre). Le cœur de la saison de feu correspondant à une activité forte

passerait de 36 jours (18 juillet-22 août) à 70 jours en 2050 (30 juin-7 septembre), puis à 92 jours en 2090 sous RCP 8.5 (17 juin-16 septembre). Bien sûr, ces dates ne correspondent qu'à des indications moyennes (sur 20 ans), chaque saison de feu individuelle présentant une chronologie propre. Ces résultats illustrent cependant la nécessité d'allonger progressivement la période de mise en œuvre des dispositifs opérationnels de manière quasi symétrique entre le début et la fin de saison, induisant une fatigue accrue des personnels impliqués, d'autant que plus de la moitié des activités engendrées par le changement climatique auront lieu en dehors du cœur de la saison historique (18 juillet-22 août, **Fig. 3.15**). L'autre moitié de ces hausses d'activité auront lieu pendant cette période, cette intensification induisant des problèmes de concomitance des feux, dont l'intensité sera de plus en plus marquée.

Ces projections présentent des incertitudes importantes en raison du choix des modèles climatiques et de leurs divergences, mais aussi des hypothèses de modélisation, qui supposent que la relation entre l'activité des feux et l'IFM n'évoluera pas au cours du siècle. Or, compte tenu de l'ampleur des changements projetés, il est probable que celle-ci sera modifiée, en fonction de l'évolution des politiques de prévention et de lutte, mais aussi des dépérissements potentiels de la végétation et de changements d'usage des sols. Il s'agit donc de résultats de prospective purement liés aux effets du changement climatique sur l'humidité des combustibles et l'éclosion/propagation. Ils permettent cependant d'appréhender l'ampleur des changements attendus malgré ces incertitudes. On rappellera également que ces projections correspondent à des modèles climatiques sous-estimant les observations de la période 2001-2020 sur la zone Sud-Est, les données d'activité rapportées pouvant parfois donner l'impression que ces projections sont « en retard » sur les observations, malgré l'ampleur des changements projetés.

4. Projections en zone Sud-Ouest (4 départements de la zone AtGeRi)

Ce chapitre décline le même type d'analyse que le chapitre 3, mais pour les quatre départements de la zone Sud-Ouest retenus dans l'étude (Gironde, Landes, Dordogne et Lot-et-Garonne). Certains éléments méthodologiques inchangés par rapport à la partie 3 seront répétés entre crochets « [] » afin de faciliter la lecture des lecteurs n'ayant pas lu le chapitre 3 (la lecture du chapitre méthodologique 2 est cependant vivement recommandée). Ces passages entre crochets pourront donc être sautés par le lecteur ayant lu le chapitre 3 dans le détail.

4.1. *Projections pour l'ensemble de la zone Sud-Ouest*

Dans cette section, on s'intéresse aux tendances globales de l'activité des feux estivale pour les quatre départements de la zone Sud-Ouest retenus dans l'étude.

Évolution de l'activité moyenne des feux

La **figure 4.1** présente l'évolution de l'activité des feux annuelle moyenne pour le RCP 4.5 (bleu) et 8.5 (rouge) et ceci pour 4 métriques : **(a)** le nombre de feux > 1 ha, **(b)** le nombre de feux > 20 ha, **(b)** le nombre de feux > 100 ha et **(d)** les surfaces brûlées. Par rapport à l'étude sur la zone Sud-Est, nous avons introduit ici les feux de taille « significative » (> 20 ha) afin d'analyser plus finement les régimes de feux compte tenu de l'activité des grands feux plus réduite sur cette zone.

[Il s'agit ici de moyennes sur 20 ans. Un second axe des ordonnées, à droite des graphiques, permet de traduire les augmentations en termes de pourcentages, par rapport à la référence correspondant au climat potentiel de la période de référence 2001-2020. Cette référence historique théorique apparaît cohérente avec les observations faites sur la période 2006-2020 (croix noires), ou avec les simulations *Firelihood* représentative de la climatologie historique 2001-2020 calculée à partir de la réanalyse SAFRAN. Comme en zone Sud-Est, les projections pour la période de référence 2001-2020 sont cependant légèrement inférieures en raison de la sous-estimation des projections d'IFM issues des modèles climatiques (voir section 2.1 et 2.3). Elles montrent cependant que les ordres de grandeurs simulés sont cohérents.]

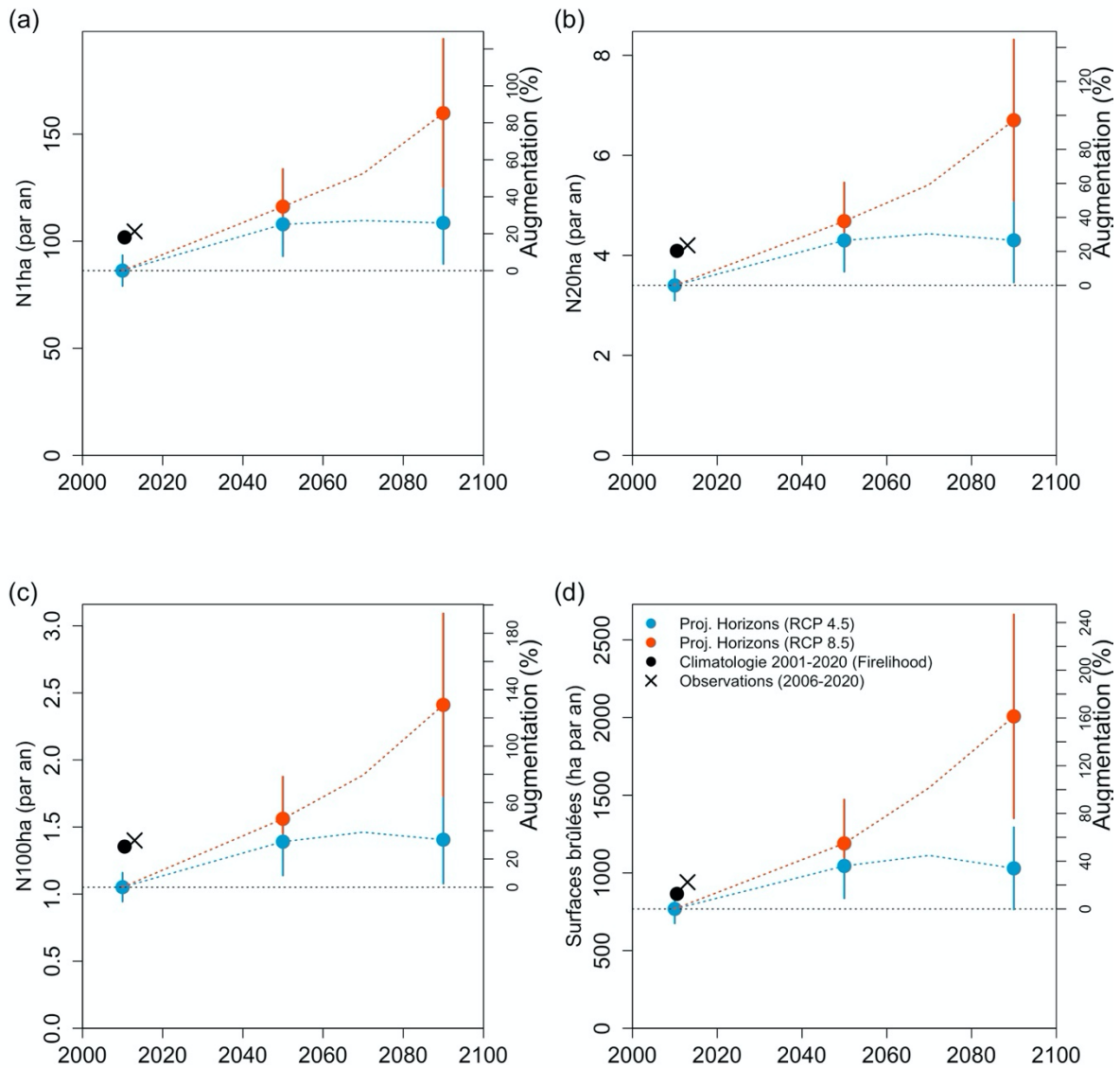


Figure 4.1. Projections d'activité des feux au 21^{ème} siècle pour **(a)** le nombre de feux qui échappent (> 1 ha), **(b)** le nombre de feux de taille « significative » (> 20 ha), **(c)** le nombre de grands feux (> 100 ha) et **(d)** les surfaces brûlées, selon deux scénarios (RCP 4.5 en bleu et 8.5 en rouge). Les différents horizons correspondent à des moyennes annuelles pour des périodes de 20 ans. Les barres verticales représentent l'écart type lié à l'incertitude entre modèles climatiques (+/- un écart type). La croix noire représente la moyenne des observations issues de la BDIFF pour la période 2006-2020, alors que le point noir représente la moyenne des simulations *Firelihood* pour la climatologie 2001-2020, issue de la réanalyse SAFRAN.

Selon le scénario RCP 4.5, N1ha passerait de 86 à 108 par an en 2050, soit une augmentation de 25 % et se stabiliserait en fin de siècle. Sous RCP 8.5, la trajectoire des N1ha serait rapide jusqu'en milieu de siècle (116 feux par an, +35 %), puis divergerait ensuite avec une accélération exponentielle en milieu de siècle (160 feux par an, +85 %). Les tendances générales sont similaires pour les feux de plus de 20 ha, les grands feux et les surfaces brûlées, mais les augmentations sont beaucoup plus importantes. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation du danger accroît non seulement les probabilités d'éclosion et la propagation initiale, favorisant ainsi le nombre de petits feux, mais

également leur développement au-delà de 1 ha. Le nombre annuel de feux de plus de 20 ha passerait donc d'une moyenne de 3.4 feux par an à environ 4.7 en 2050, pour atteindre 6.7 en fin de siècle en RCP 8.5 (+97 %). Le nombre annuel de grands feux passerait donc d'une moyenne de 1.1 feux par an à environ 1.6 en 2050, pour dépasser 2.4 en fin de siècle en RCP 8.5 (+129 %). Les surfaces brûlées augmenteraient d'environ 161 % dans les mêmes conditions. Une différence entre scénario apparaît dès 2050 -de manière légèrement plus marquée que la différence entre RCP observée en zone Sud-Est-, mais celle-ci reste dans la marge des incertitudes. De plus, les métriques qui augmentent le plus ne sont pas les grands feux, mais les surfaces brûlées, ce qui pourrait s'expliquer notamment par une plus forte continuité des zones combustibles en zone Sud-Ouest, augmentant ainsi le potentiel de développement de feux très grands. Cependant, on notera que les augmentations prédites selon les différents scénarios sont inférieures à celles de la zone Sud-Est, y compris pour les surfaces brûlées, traduisant ainsi une augmentation du danger légèrement moindre en zone Sud-Ouest dès 2050. L'ensemble des métriques correspondantes sont rapportées dans des tableaux présentés en **Annexe B (Table B.3 et B.4)**.

[Les barres verticales de la figure 4.1 représentent l'incertitude liée au choix de modèle climatique (une fois l'écart type des différences entre les 10 modèles climatiques les plus proche de la sélection DRIAS). L'importance des augmentations prédites excède toutefois l'ampleur des incertitudes entre modèles. On notera cependant que l'incertitude est ici calculée en moyenne pour des périodes de 20 ans, alors que la variabilité interannuelle de l'activité des feux est très importante. A l'échelle annuelle, cette variabilité naturelle (du climat et des feux) est telle que l'on continuera à observer régulièrement en fin de siècle des saisons de feux de niveau comparable à la période historique, y compris en RCP 8.5, mais elles seront de moins en moins fréquentes. A l'inverse, les saisons extrêmes seront de plus en plus marquées (voir section suivante). Cette variabilité naturelle peut constituer un frein à la perception de l'accroissement du danger lors des années de faible activité d'incendie, ou au contraire l'exacerber les années de forte activité, avec des implications possibles pour la décision publique d'adaptation.]

Par rapport aux incertitudes, il convient de rappeler que les projections sont sensibles au choix de la période de référence retenue pour l'activité des feux (ici une période représentative de l'activité observée sur la période 2006-2020), car la relation feu-climat, n'est pas forcément stable dans le temps.

[Pour finir, l'approche présentée ici s'appuie sur des scénarios RCP et des horizons (2010, 2050, 2090) conformément à la commande. Cependant, de plus en plus de documents officiels et scientifiques raisonnent en degrés de réchauffement global. L'encadré 4.1 permet d'établir une équivalence entre les deux approches.]

Encadré 4.1. Horizon, scénario RCP ou degrés de réchauffement global.

La **Figure 4.2** présente les mêmes informations que la figure 4.1 pour le scénario RCP 8.5, mais nous avons replacé sur cette trajectoire les niveaux correspondant aux différents degrés de réchauffement global, de +1.5°C à +4°C, conformément à la Trajectoire d'Adaptation au Changement Climatique (TRACC, voir paragraphe 2.5). On rappelle que cette trajectoire peut paraître un peu optimiste à court terme, au regard des modèles climatiques utilisés dans la présente étude (CMIP5), puisque selon les RCP, +1.5°C puis +2°C seraient plutôt atteints respectivement entre 2022 et 2026, puis 2037 et 2048 (**figure 2.5**) et non en 2030 puis 2050.

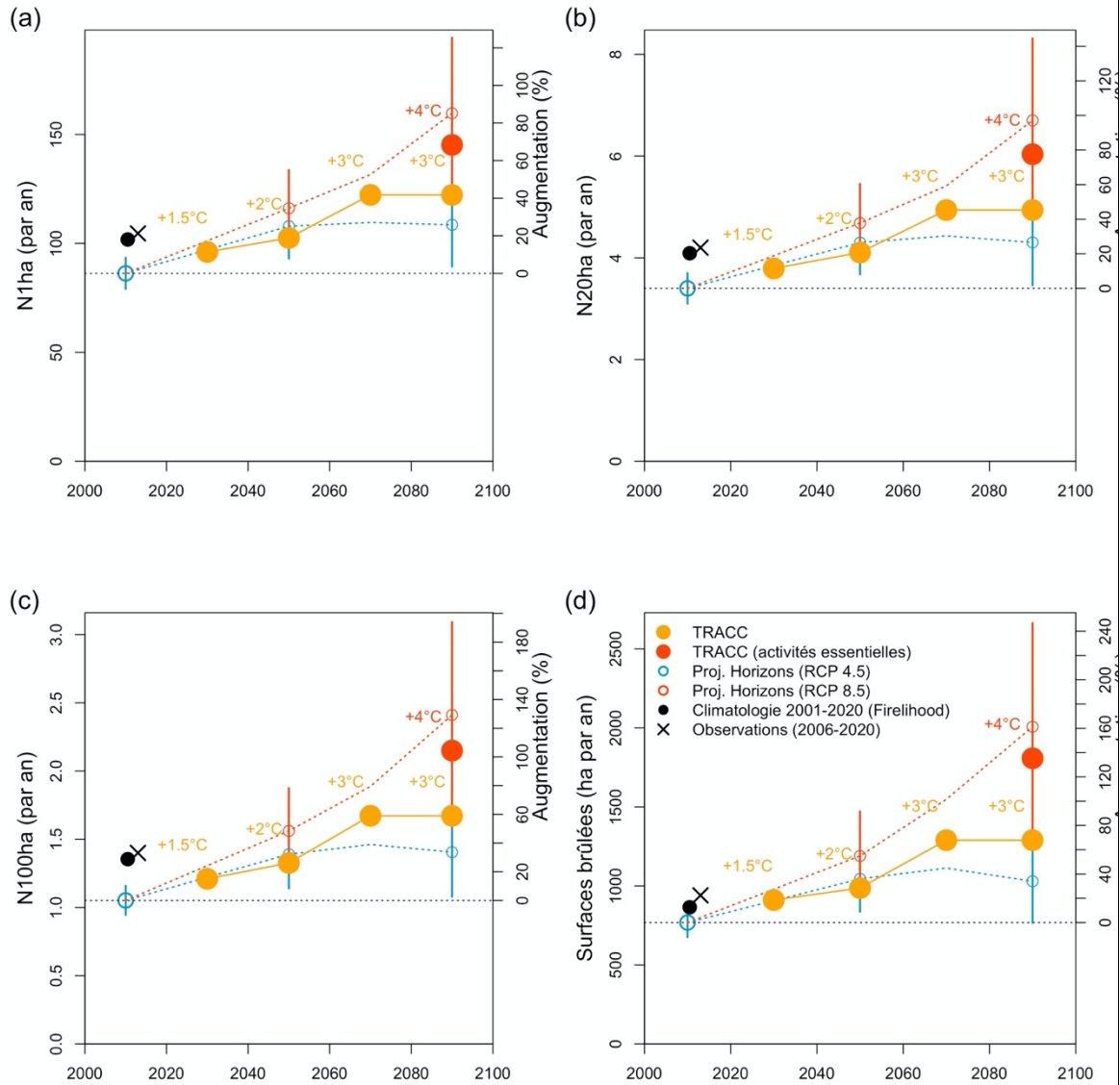


Figure 4.2. Même figure que la figure 4.1, avec les degrés de réchauffement positionnés selon la TRACC.

Évolution de l'activité des feux lors des années extrêmes

[Comme expliqué dans la section précédente, les moyennes d'activité des feux sur 20 ans sont peu informatives vis-à-vis des années extrêmes, qui sont en pratique les plus problématiques, notamment pour les services opérationnels. Le formalisme probabiliste et les simulations multiples permettent de calculer des tendances sur ces années extrêmes. Nous avons ici retenu deux métriques, l'une correspondant au retour « décennal », c'est-à-dire la pire saison de feu observée tous les 10 ans et une métrique « extrême » correspondant aux pires activités observées pour les périodes de retour supérieures à 10 ans. Cette dernière métrique dite « des extrêmes²⁴ » présente l'intérêt d'être beaucoup plus stable et donc moins hasardeuse qu'une métrique correspondant à un retour de 30 ans ou plus, qui serait difficile à estimer avec peu de répétitions climatiques dans un régime transitoire.]

La **figure 4.3** représente pour le RCP 8.5, les moyennes sur 20 ans en rouge, complétées en violet par le retour à 10 ans et la métrique caractéristique des extrêmes en marron. Bien que légèrement sous estimées en regard des observations sur la période 2001-2020 (encore une fois parce que l'IFM projeté est plus faible que les observations), les métriques « décennal » et « extrême » sont représentatives des observations sur la période historique, la plus grosse des deux étoiles représentant le maximum observé entre 2006 et 2020.

Compte tenu de la variabilité interannuelle très importante de l'activité des feux et du climat, les années extrêmes atteignent des niveaux beaucoup plus élevés que les années moyennes. Sur la période 2001-2020, les N1ha présentant un retour « décennal » et « extrêmes » sont respectivement de 121 et 142 feux par an, contre 86 pour N1ha « moyen ». De même, les années extrêmes atteignent 8.1 feux > 20 ha, 3.7 feux > 100 ha et 3900 ha par an. Sous RCP 8.5, les extrêmes projetés atteindront respectivement 242 feux supérieurs à 1 ha, 13 feux > 20 ha, 6 feux supérieurs à 100 ha et 10100 ha brûlés à cet horizon. Enfin, on notera que les surfaces brûlées dite extrêmes sont de l'ordre de cinq fois plus élevées que le bilan moyen, à la fois pour la période présente et la période future, contrairement à la zone Sud-Est, dans laquelle ils sont de l'ordre de trois fois le bilan moyen. Elle se situe également très largement au-dessus du retour décennal, lui-même de l'ordre du double du bilan moyen (comme en zone Sud-Est). Ces éléments soulignent un potentiel en zone Sud-Ouest pour des années présentant des bilans exceptionnels élevés, mais avec une période de retour longue (>décennale), qui s'explique par les variabilités de la météorologie d'une part, mais aussi par la stochasticité de la relation entre météorologie annuelle et surfaces brûlées effectives²⁵.

²⁴ Il s'agit de l'Expected Shortfall, qui correspond à l'espérance de l'activité observée pour les années présentant un retour supérieur au retour décennal

²⁵ correspondant à une queue de distribution des tailles de feu lourde

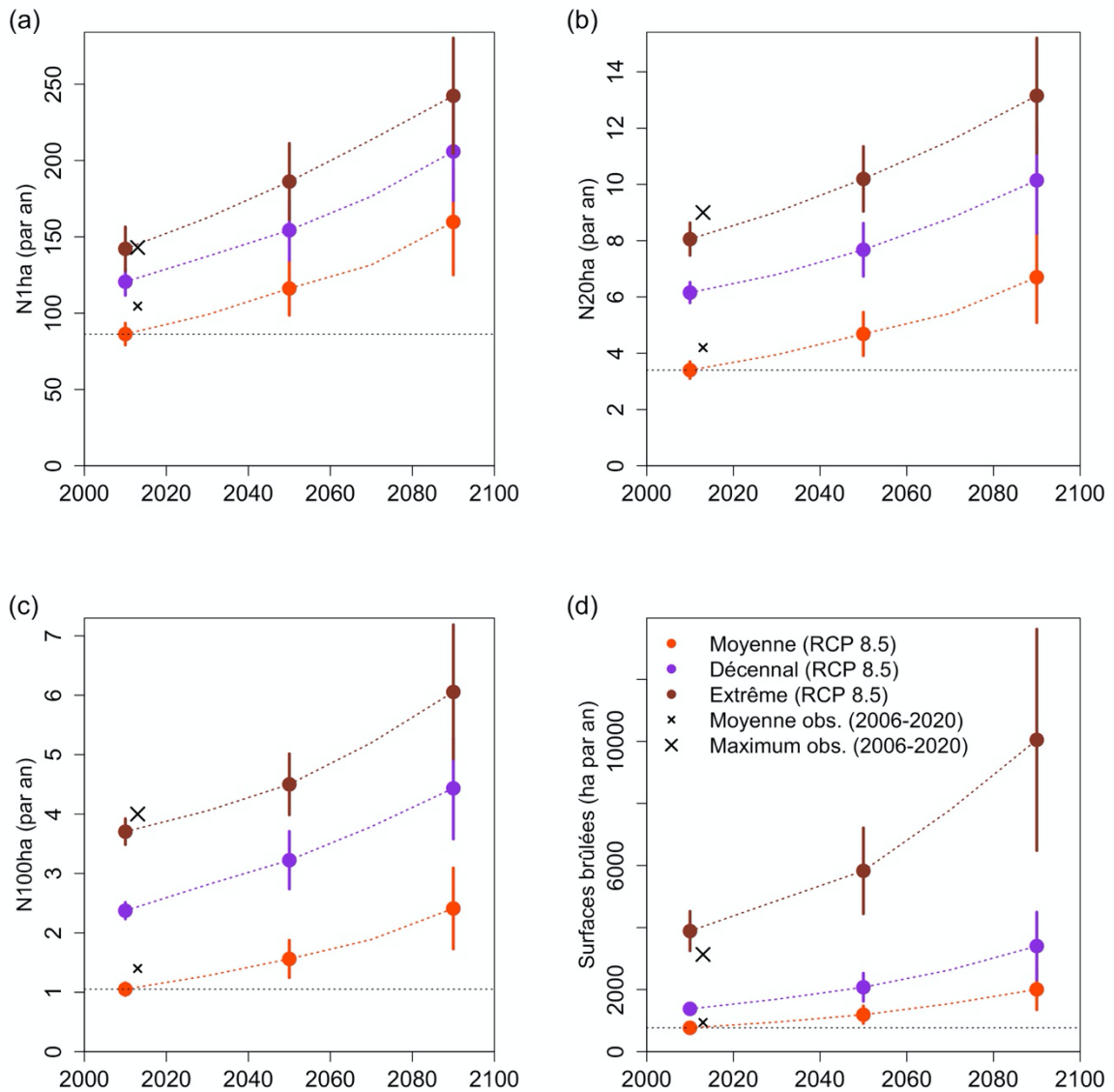


Figure 4.3. Projections de l'activité des feux moyenne (en rouge), décennale (en violet) et extrême (en marron) au 21^{ème} siècle selon le RCP 8.5 pour **(a)** le nombre de feux qui échappent (> 1 ha), **(b)** le nombre de grands feux (> 20 ha), **(c)** le nombre de grands feux (> 100 ha) et **(d)** les surfaces brûlées. Les différents horizons correspondent à des moyennes annuelles pour des périodes de 20 ans. Les barres verticales représentent l'écart type lié à l'incertitude entre modèles climatiques (+/- un écart type).

On notera que les augmentations de ces métriques (anomalies) sont plus importantes que celles des moyennes lorsqu'on les exprime en nombres de feux ou en surfaces. En revanche, l'augmentation relative (exprimée en %) peut, comme en zone Sud-est, être moins élevée avec par exemple +64 % pour les N100ha « extrêmes », alors que les N100ha « moyens » augmentent de +129 % en 2090 sous RCP 8.5. En conséquence, le ratio entre « extrêmes » et « moyennes » aurait tendance à décroître de l'ordre de 3.5 fois le bilan moyen pour les N100 pour décroître vers 2.5 en fin de siècle sous RCP 8.5. En revanche, le ratio entre surfaces extrêmes et moyennes annuels se maintiendrait autour de 5 tout au long

du siècle, le potentiel pour des bilans exceptionnels élevés, mais avec une période de retour longue (>décennale) se maintenant au cours du siècle. Ainsi, Les futurs nombres de grands feux et surfaces brûlées lors des saisons extrêmes pourraient atteindre respectivement 5.8 et 13 fois les valeurs moyennes de la période de référence 2001-2020. Enfin, les retours décennaux sont typiquement de 2.2 et 1.8 fois le bilan moyen en termes de nombre de grands feux ou de surfaces brûlées en période historique. Ce ratio aurait tendance à légèrement se réduire au cours du siècle pour tendre vers 1.8, car leurs augmentations relatives sont un peu plus faibles que celles des tendances moyennes. Comme pour la zone Sud-Est, ce résultat fait l'hypothèse que les services opérationnels arrivent à maintenir la même efficacité dans le futur que sur la période 2006-2020 (voir discussion au chapitre 5), puisque l'on extrapole le futur sur la base de la relation feu-climat historique.

Ces bilans, que ce soit en moyenne sur 20 ans (**Fig. 4.1**) ou pour les saisons extrêmes (**Fig. 4.2**) pourront sembler faibles au regard des activités observées durant la saison 2022. Cette saison 2022 s'est caractérisée par des niveaux records d'humidité relative de l'air et de teneur en eau de la végétation vivante pendant 10 à 30 % des jours de l'été dans le Sud-Ouest de la France (Rodrigues et al. 2023). Même en prenant compte ces niveaux de danger observés particulièrement élevés, il est possible que la version actuelle de *Firelihood* sous-estime l'activité observée en 2022²⁶. Notons qu'en Aquitaine, il faut remonter aux incendies de la fin des années 1940 pour observer des feux de l'ampleur de ceux de 2022, autrement dit les données utilisées pour estimer cette version de *Firelihood* ne comportent aucun feu d'une ampleur approchant ceux de 2022. Pour autant, en principe, la modélisation statistique de la distribution de taille des feux mise en œuvre ici²⁷ permet d'évaluer la probabilité d'occurrence et la surface d'incendies plus rares et plus grands que tous ceux enregistrés dans la base de données utilisée pour l'estimation du modèle. Il convient par conséquent d'expliquer de manière plus approfondie les raisons de cette possible sous-estimation.

D'abord, la nature des deux grands feux de Landiras et de la Teste de Buch sort quelque peu du cadre de la modélisation *Firelihood*, qui simule essentiellement des feux se propageant sur une ou deux journées, sur la base de l'IFM du jour du départ du feu, alors que ces deux grands feux de 2022 se sont propagés sur plusieurs semaines, après avoir échappé au contrôle initial des forces de lutte. C'était également le cas du feu de Gonfaron en 2021 dans le Var. De plus, la modélisation de la taille des très grands feux (la queue de distribution) en zone Sud-Ouest pourrait être imprécise, car seulement 64 feux de plus de 20 ha, 23 feux de plus de 100 ha et 2 feux de plus de 1000 ha y ont été observés entre 2006 et 2020. Dans ce contexte, nous pensons que les projections des nombres de feux de 1 et 20 ha, voire 100 ha, sont probablement plus fiables que celles des surfaces brûlées. Même si elle ne reflète pas directement les événements les plus extrêmes, ces métriques sont importantes, car ce sont l'émergence et la multiplication des feux de tailles modeste qui augmentent les probabilités que de tels événements extrêmes se produisent. Enfin, il est clair que le fait que les modèles climatiques de CMIP5, et en particulier ceux retenus dans

²⁶ Cette assertion n'a pas pu être vérifiée, car les données de réanalyse SAFRAN pour l'ensemble de la saison estivale 2022 ne sont pas encore disponibles.

²⁷ Distribution de Pareto Generalisée pour les feux dépassant 20 ha, conformément à la théorie des valeurs extrêmes (Koh et al. 2023).

la sélection DRIAS 2020, présentent des niveaux d'IFM plus faibles que ceux observés historiquement (**Fig. 2.1**), contribue largement au phénomène, puisque les activités simulées par le modèle à partir de la climatologie réellement observée excède largement celle projetée (« point noir » de la **Fig. 2.3**). On notera d'ailleurs que si l'on utilise un modèle avec lequel le niveau d'activité sur la période historique correspond mieux aux observations, comme par exemple ceux correspondant aux niveaux de danger plus élevés CanESM2/RCA4 ou CSIRO-Mk3/RCA4 (voir **Fig. 2.4**), des années dépassant les 10000ha et même les 15000ha peuvent se produire dans la période contemporaine (**Figure 4.4**), même si leur fréquence de retour est très faible (l'enveloppe orange correspondant au quantile 95 % des surfaces brûlées annuelles simulées par *Firelihood*). La **figure 4.4** illustre au passage l'écart particulièrement élevé qui peut exister entre une tendance moyenne et une observation extrême présentant une longue période de retour, comme pourrait l'être le bilan de l'été 2022 de la Gironde, qui peut rappeler par certains aspects le caractère atypique de la saison 2003 en zone Sud-Est, qui ne s'est heureusement pas reproduite depuis.

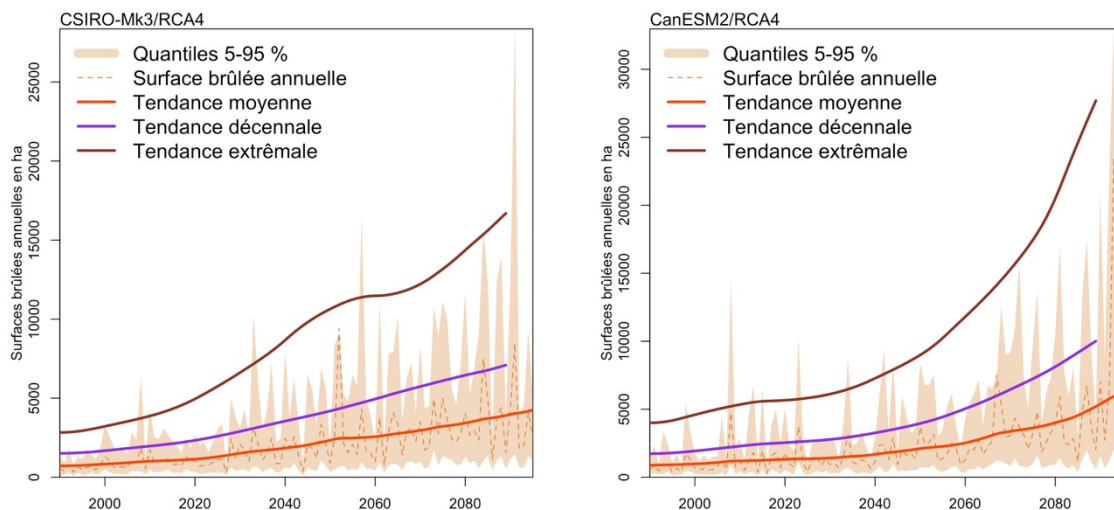


Figure 4.4. Projections de l'activité des feux moyenne (en rouge), décennale (en violet) et extrême (en marron), ainsi que des quantiles des surfaces brûlées potentielles pour chaque année (calculés à partir de 300 simulations de *Firelihood*) au 21^{ème} siècle selon le RCP 8.5 et les modèles climatiques australien et canadien, dont l'utilisation conduit à des niveaux d'activité feu comparables aux observations dans la période 2001-2020 (voir **Fig. 2.4**). Les pics correspondant aux saisons extrêmes présentant les périodes de retour les plus longues (quantile 95 %) illustrent le fait que des bilans à plus de 10000ha par an ne sont pas irréalistes, y compris en climatologie historique, même s'ils sont très largement supérieurs aux tendances moyennes.

Dans tous les cas, une actualisation de *Firelihood* semble souhaitable lorsque les données de 2022 (observations de feux et météo) seront disponibles. En effet, l'inclusion de la saison 2022 dans l'ajustement du modèle pourrait modifier la nature de ces projections, en particulier en ce qui concerne les projections de surfaces brûlées. Cependant, au-delà de potentiels limitations du modèle probabiliste, ce sont avant tout les faibles niveaux d'IFM projetés dans le cadre de CMIP5 sur la période 2001-2020 qui rendent l'événement 2022 très improbable dans les projections d'activité sur la période historique. Les simulations issues de CMIP6, les futures méthodes de descente d'échelle et les travaux d'attributions permettront sans doute d'y voir plus clair sur les causes de cette sous-estimation de l'IFM

dans les projections de la période 2001-2020. Compte-tenu des différentes incertitudes, le reste du chapitre se concentre sur les tendances moyennes issues des projections multi-modèles CMIP5, qui fournissent une trajectoire permettant de quantifier les évolutions des activités des feux en termes d'expansion spatiale et d'allongement de saison de feu.

4.2. ***La zone à risque Sud-Ouest : expansion future et intensification***

Dans cette section, on s'intéresse à la cartographie de l'activité des feux et à son évolution, en particulier l'expansion spatiale et la répartition de la hausse de l'activité des feux future, dont son intensification dans la zone à risque historique.

Cartographie des surfaces brûlées

La **figure 4.5** présente l'évolution des surfaces brûlées correspondant aux horizons et au scénario présentés dans la section précédente. La distribution correspondant à la période historique (**Fig. 4.5a**) reproduit plutôt bien les patrons spatiaux réellement observés sur la période 2006-2020 (**Fig. 4.5** en bas à gauche), bien qu'il s'agisse de climat potentiel, même si les observations sont bien sûr beaucoup moins lissées dans l'espace que la moyenne des 300 simulations *Firelihood*.

Sous l'effet du changement climatique, les surfaces brûlées augmentent en particulier en Gironde et en Dordogne, et dans une moindre mesure dans les Landes. Si l'on compare ces cartes par rapport aux observations de la saison 2022²⁸, on constate que l'activité des feux pourrait être sous-estimée par le modèle, en particulier dans le sud du massif landais, où elle reste comprise entre 1 et 4 ha par pixel et par an en moyenne (en vert clair).

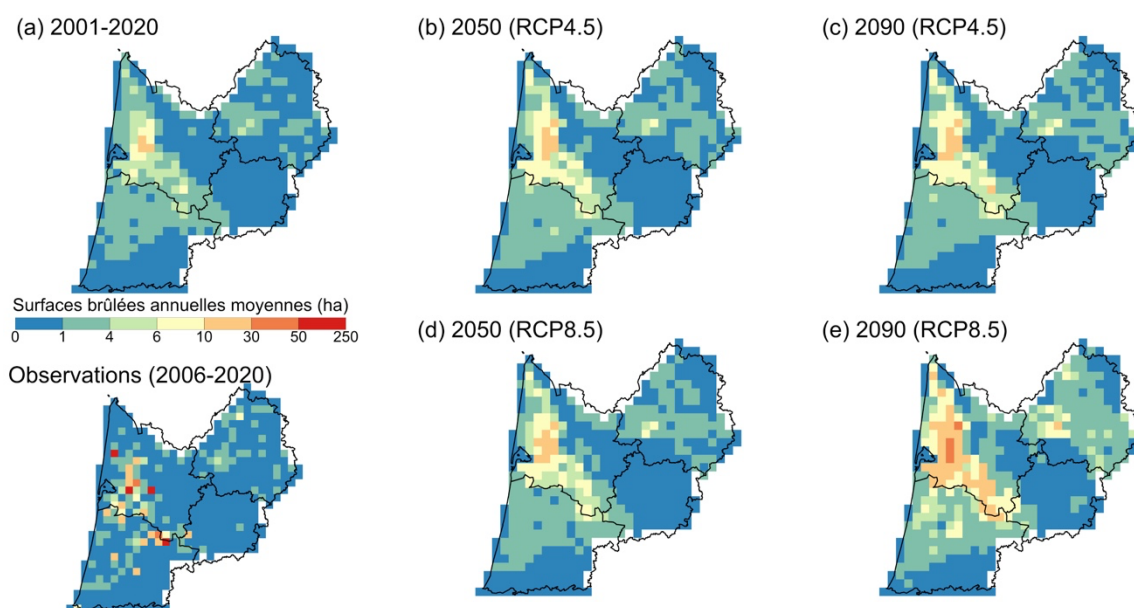


Figure 4.5. Surfaces brûlées annuelles moyennes (en ha par pixel de 8 km de côté), selon les projections climatiques du modèle *Firelihood* pour la période historique (**a**) et les horizons 2050 et 2090 sous scénario RCP 4.5 (**b et c**) et RCP 8.5 (**d et e**). A titre de référence, les observations issues de la base de données du GIP ATGeRi pour la période 2006-2020 sont présentées en bas à gauche. Les délimitations en traits noirs épais correspondent aux limites des départements.

²⁸ 7 feux de plus de 20 ha en Gironde, dont 5 dépassent les 100 ha, 3 dépassent les 5000 ha et 1 dépasse les 10000ha ; 7 feux de plus de 20 ha dans les Landes dont 3 dépassent les 100 ha, mais aucun n'atteint les 1000 ha (Source ONF).

Des cartes similaires peuvent être produites pour les nombres de feux (N1ha, N20ha ou N100ha). Afin de conduire des analyses plus synthétiques, nous produisons à la section qui suit une analyse multi-métrique fondée sur 5 niveaux d'activités.

Cartographie du niveau d'activité des feux et expansion de la zone à risque

[Comme pour la zone Prométhée, nous avons classé les pixels SAFRAN (de 8 km) de la zone Sud-Ouest selon 5 niveaux de risque (qualifiés de faible à extrême) prenant en compte les valeurs annuelles de N1ha, N20ha, N100ha et Surfaces brûlées calculés par *Firelihood* pour les différents pixels et pour les horizons 2001-2020, 2050 et 2090, à l'aide d'une méthode de partitionnement de données appelée *k-moyennes*.] Cette méthode permet de définir objectivement des groupes ou classes homogènes d'activité des feux (ici k=5 groupes) selon une échelle permettant de suivre l'évolution du niveau d'activité en zone Sud-Ouest tout au long du 21^{ème} siècle.

Si l'on applique cette classification à la période de référence (**Fig. 4.6a**), on observe que l'essentiel de la zone (76 %) correspond à un niveau d'activité de la catégorie dite faible, le reste (24 %) étant à risque modéré à extrême. Dans la suite de cette section, *on appellera* « zone à risque » les portions du territoire présentant un risque au moins modéré. Cette zone à risque constitue une représentation plutôt fidèle des zones présentant les surfaces brûlées les plus importantes pendant la période 2006-2020 (**Fig. 4.5**). Elle est également relativement représentative de l'activité des feux de l'année 2022, même si l'étendue de la zone à risque pourra apparaître sous-estimée dans le sud du massif landais. On rappelle que ces niveaux d'activités de faible à extrême ont été établis pour l'ensemble du siècle et pas uniquement au regard de la période historique.

Il convient de noter que certains pixels classés en catégorie « faible » présentent néanmoins une activité « feu de forêt », puisque le nombre de feu > 1 ha médian y est de 0.13 feux par pixel et par an (voir **Table de la Fig. 4.6** en bas à gauche), contre par exemple 0.067 feux par pixels et par an dans la catégorie dite faible en zone Sud-Est. Cependant, ces pixels ont présenté une activité de feu très limitée pour les plus grands feux entre 2008 et 2020, ce qui a conduit le modèle et l'algorithme de classification à les grouper ensemble. En effet, en dehors des N1ha, la classe à niveau « faible » présente une activité très largement inférieure à celle de la classe modérée pour toutes les métriques (ratio de l'ordre de 4 à 6).

Ces niveaux sont en revanche bien inférieurs à ceux observés en zone Sud-Est pour les feux estivaux (voir encadré 4.2).

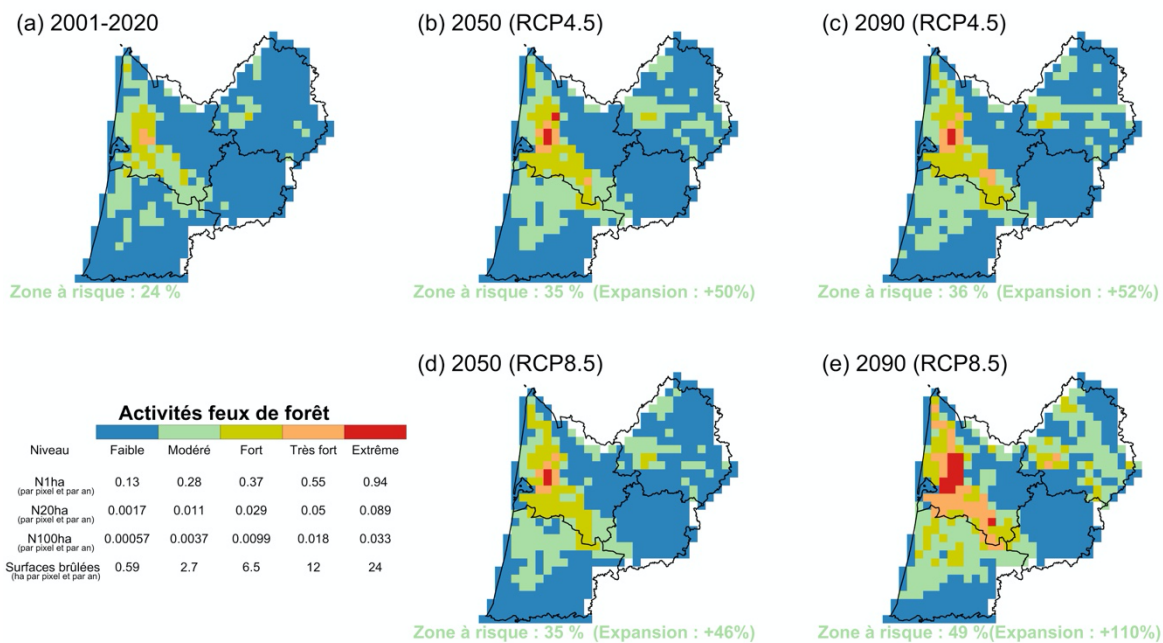


Figure 4.6. Cartographie du niveau d'activité feux de forêt déterminée à partir d'une classification en 5 niveaux. Les métriques d'activités annuelles médianes correspondant aux différents niveaux sont rapportées en dessous de l'échelle de couleurs présentant les 5 niveaux. Le pourcentage correspondant à la zone à risque pour chaque horizon et scénario correspond au pourcentage de pixel présentant un risque au moins modéré, l'expansion de cette zone étant calculée par rapport à la référence 2001-2020. Les délimitations en traits noirs épais correspondent aux départements. On notera que la classe de niveau dit « faible » intègre un certain nombre de pixels dans laquelle l'activité des feux de forêt est présente en période historique, mais essentiellement au travers de petits feux, comme dans la vallée de la Garonne notamment.

Encadré 4.2. Cartographie de l'expansion en zone Sud-Ouest à partir des niveaux d'activité de la zone Sud-Est

La **Figure 4.7** présente les mêmes informations que la figure 4.6, mais la classification par niveau d'activité a été réalisée en utilisant les « clusters » obtenus pour les feux estivaux de la zone Sud-Est (voir **Fig. 3.5**). La comparaison des **figures 4.6 et 4.7** est utile à plus d'un titre. D'abord, on y voit que les pixels présentant une activité de feu comparable à celle observée en zone Sud-Est concerne essentiellement le Sud-Ouest de la Gironde et que c'est essentiellement dans ce département que l'expansion se produit, même si une partie des Landes et de la Dordogne est concernée en 2090 sous RCP 8.5.

Ensuite, on voit que les métriques d'activité correspondant à chaque cluster sont assez différentes entre les clusters « Sud-Ouest » (**Fig. 4.6**) et les clusters Sud-Est (**Fig. 4.7**). Le niveau faible en Sud-Ouest présente un nombre de feux de 1 ha en moyenne deux fois plus élevé qu'en Sud-Est, ce qui traduit le fait que certains pixels classés en niveau faible dans la zone Sud-Ouest présentent potentiellement une activité plus élevée en termes de petits feux. En revanche, la tendance s'inverse en ce qui concerne les feux de tailles plus importantes et en particulier les grands feux dont la fréquence est beaucoup plus faible en zone Sud-Ouest.

Là encore, une mise à jour de l'étude incluant l'année 2022 sera nécessaire.

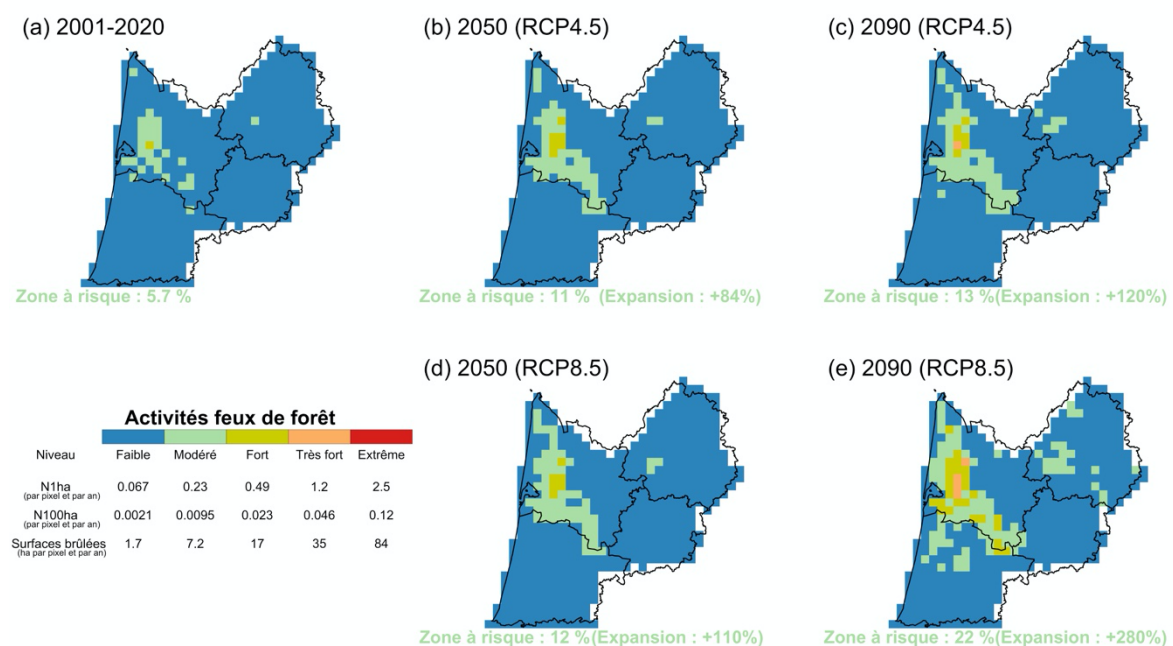


Figure 4.7. Même figure que la figure 4.6, mais réalisée avec une classification des niveaux d'activité obtenus pour les feux estivaux de la zone Sud-Est (cf **Fig. 3.5**).

Cette zone à risque s'étend progressivement pour atteindre 35 % du territoire quel que soit le scénario en 2050, soit une expansion spatiale de l'ordre de +45 % (**Fig. 4.6b et d**). L'horizon 2090 dépend fortement du choix de scénario, le RCP 8.5 conduisant à une zone à risque couvrant 49 % du territoire, soit une expansion de 104 % (**Fig. 4.6d**). L'expansion concerne essentiellement les Landes et la Dordogne, la distribution n'étant quasiment pas modifiée en Gironde ou dans le Lot-et-Garonne, comme le confirme la **Figure 4.8**, qui représente l'expansion sous forme d'une carte synthétique pour le RCP 8.5.

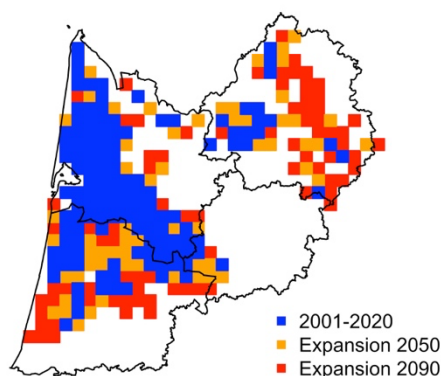


Figure 4.8. Cartographie de l'expansion de la zone à risque Sud-Ouest (présentant un risque au moins modéré) sous RCP 8.5. La même figure pour le RCP 4.5 se trouve en **Annexe C (Fig. C.7)**

[Ces zones d'expansion, qui présentent encore actuellement une activité limitée, vont concerner des populations et des territoires dans lesquels la culture du risque et la politique de prévention sont moins développées. Elles concernent également des écosystèmes sensiblement différents, potentiellement plus vulnérables. D'autres analyses sont possibles à partir de ces cartes, notamment des calculs de distances ou de vitesse d'expansion dans différentes directions sur le territoire ou selon des gradients altitudinaux, afin d'identifier les zones où les changements seront les plus rapides.]

Pour connaître la distribution précise de l'évolution du taux d'occupation des différents niveaux, on peut consulter la **Figure 4.9**. On y voit en particulier que le pourcentage de la zone à risque extrême passerait de 0 % à 2.2 % du territoire en 2090 sous RCP 8.5 et de 5 à 22 % pour le risque fort, suggérant une forte intensification de l'activité dans la zone à risque historique.

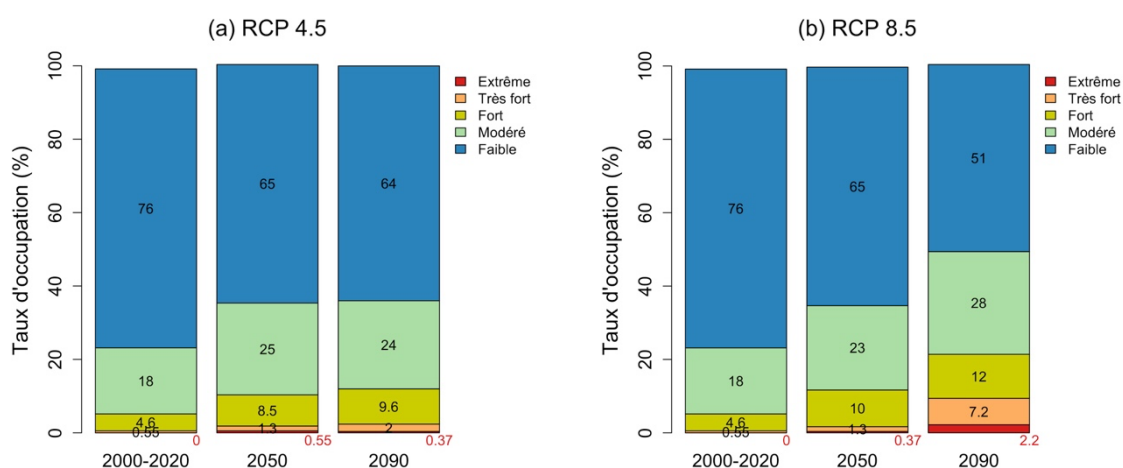


Figure 4.9. Distribution des différents niveaux de risque des pixels de 8 km de côté et de leur évolution à différents horizons, pour les scénarios 4.5 et 8.5. Le taux d'occupation indique le pourcentage de pixels de la zone Sud-Ouest couverts par les différents niveaux.

Répartition des hausses de l'activité des feux entre la zone à risque historique et le reste de la zone Sud-Ouest

On s'intéresse ici à la répartition de la hausse d'activité des feux induite par le changement climatique (c'est-à-dire l'anomalie par rapport à 2001-2020), selon que l'on se trouve ou non dans la zone à risque historique, c'est-à-dire la zone à risque au moins modéré de la période 2001-2020 (zone bleue de la **Fig. 4.8**).

On observe une situation assez contrastée entre les métriques N1ha d'un côté (**Fig. 4.10**) et N20ha, N100ha et les surfaces brûlées de l'autre (**Fig. 4.11** pour N100ha, les autres métriques, similaires dans la répartition étant présentées en **Annexe C, fig. C8 et C.9**). De l'ordre de 60 % des N1ha additionnels du fait du changement climatique aurait lieu en dehors de la zone historique, signifiant une expansion de l'activité des feux liée aux petits feux (**Fig. 4.10**). A l'inverse, 73 % des N100ha additionnels auront lieu dans la zone à risque historique (**Fig. 4.11**). Ainsi le changement climatique va induire une augmentation importante des activités des feux de petites tailles hors zone à risque, mais on retrouve comme en zone Sud-Est le fait que le gros des activités les plus importantes auront lieu au travers d'une intensification des activités dans la zone à risque historique.

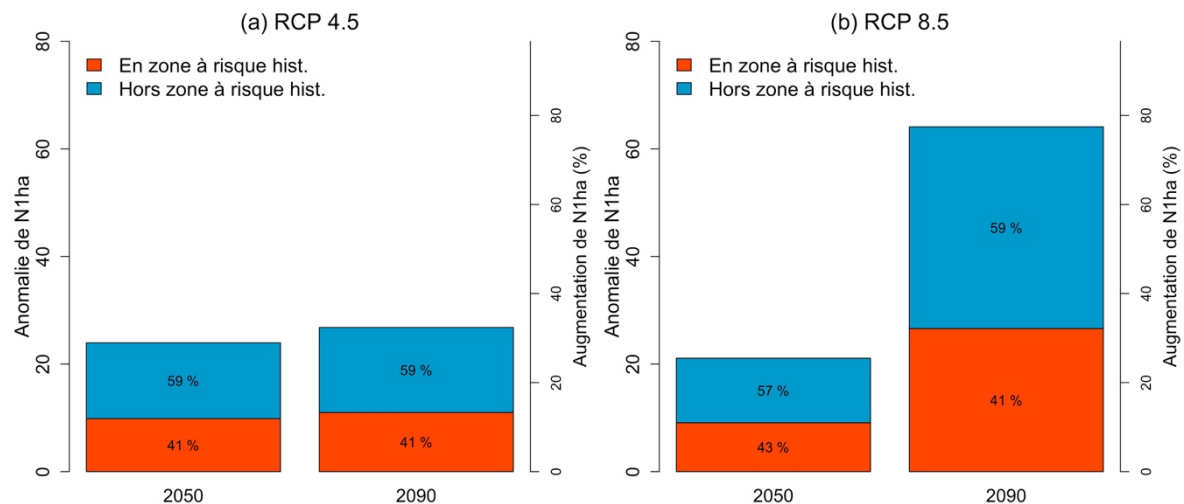


Figure 4.10. Anomalies de N1ha sous l'effet du changement climatique, distribuées par rapport à la zone à risque historique (2001-2020) en rouge ou dans la zone présentant un risque historiquement faible en bleu, pour les scénarios : **(a)** 4.5 et **(b)** 8.5.

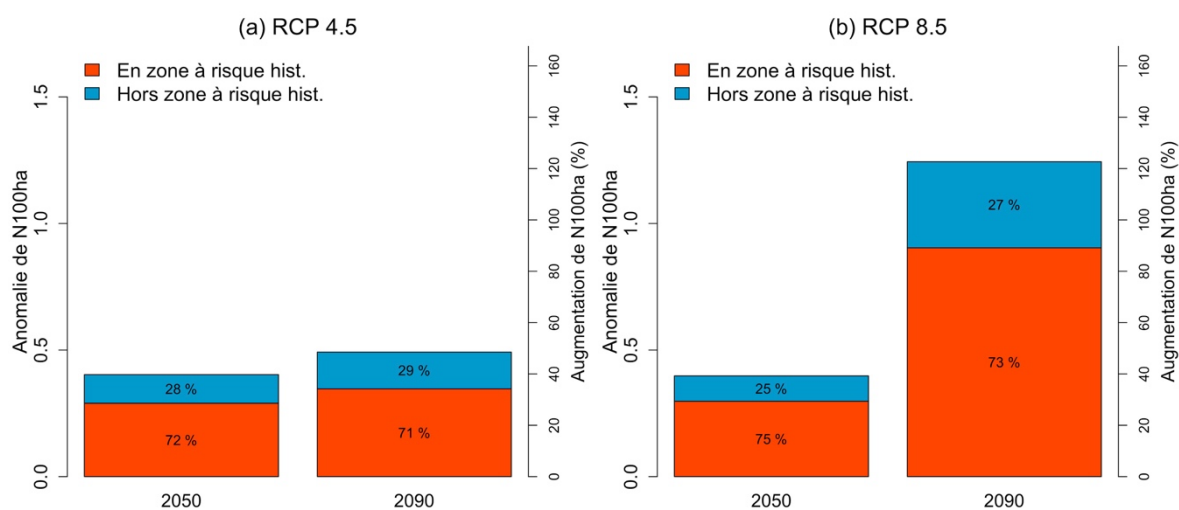


Figure 4.11. Anomalies de N100ha sous l'effet du changement climatique, distribuées par rapport à la zone à risque historique (2001-2020) en rouge ou dans la zone présentant un risque historiquement faible en bleu, pour les scénarios : **(a)** 4.5 et **(b)** 8.5.

4.3. Allongement et intensification des saisons de feu (printemps, été)

Dans cette section, on s'intéresse à l'allongement de la saison de feu et à la répartition de l'activité future des feux au cours de la saison en zone Sud-Ouest.

Saisonnalité de l'activité des feux estivaux et son évolution

La **figure 4.12** présente la saisonnalité moyenne des quatre métriques N1ha, N20ha, N100ha et Surfaces brûlées, qui présentent un double pic d'activité fin mars et début août (en bleu). Cette saisonnalité historique moyenne²⁹ reflète bien l'activité observée sur la période 2006-2020 (filtrée afin de lisser la variabilité des observations) ou la climatologie historique 2001-2020, simulée par *Firelihood*, même si on retrouve un déficit d'activité projetées sur les deux périodes d'activité. On notera cependant que le modèle probabiliste a tendance à sous-estimer l'activité des feux de printemps > 20 ha, > 100 ha et les surfaces brûlées en période historique. Cette limitation pourrait être due au fait que le modèle s'appuie sur l'IFM, alors que les services opérationnels utilisent d'autres indices (NEP, NEP vert). Cet indice pourra être pris en compte dans de futurs développements, mais les projections de cet indice n'étaient pas disponibles dans DRIAS 2020.

[Les projections futures montrent une intensification tout au long de la saison, sans modification majeure des périodes concernées. Cette augmentation généralisée de l'activité, va conduire au fait que les niveaux d'activité correspondant à l'actuel cœur de saison estivale seront atteints beaucoup plus précocement et se maintiendront plus tardivement, induisant ainsi un allongement de la saison opérationnelle. De plus, le cœur de saison va se traduire par des niveaux d'activités encore jamais observés. Nous caractérisons cet allongement et cette intensification dans les sous-sections qui suivent.]

²⁹ Sur 300 simulations *Firelihood* et les différents modèles climatiques

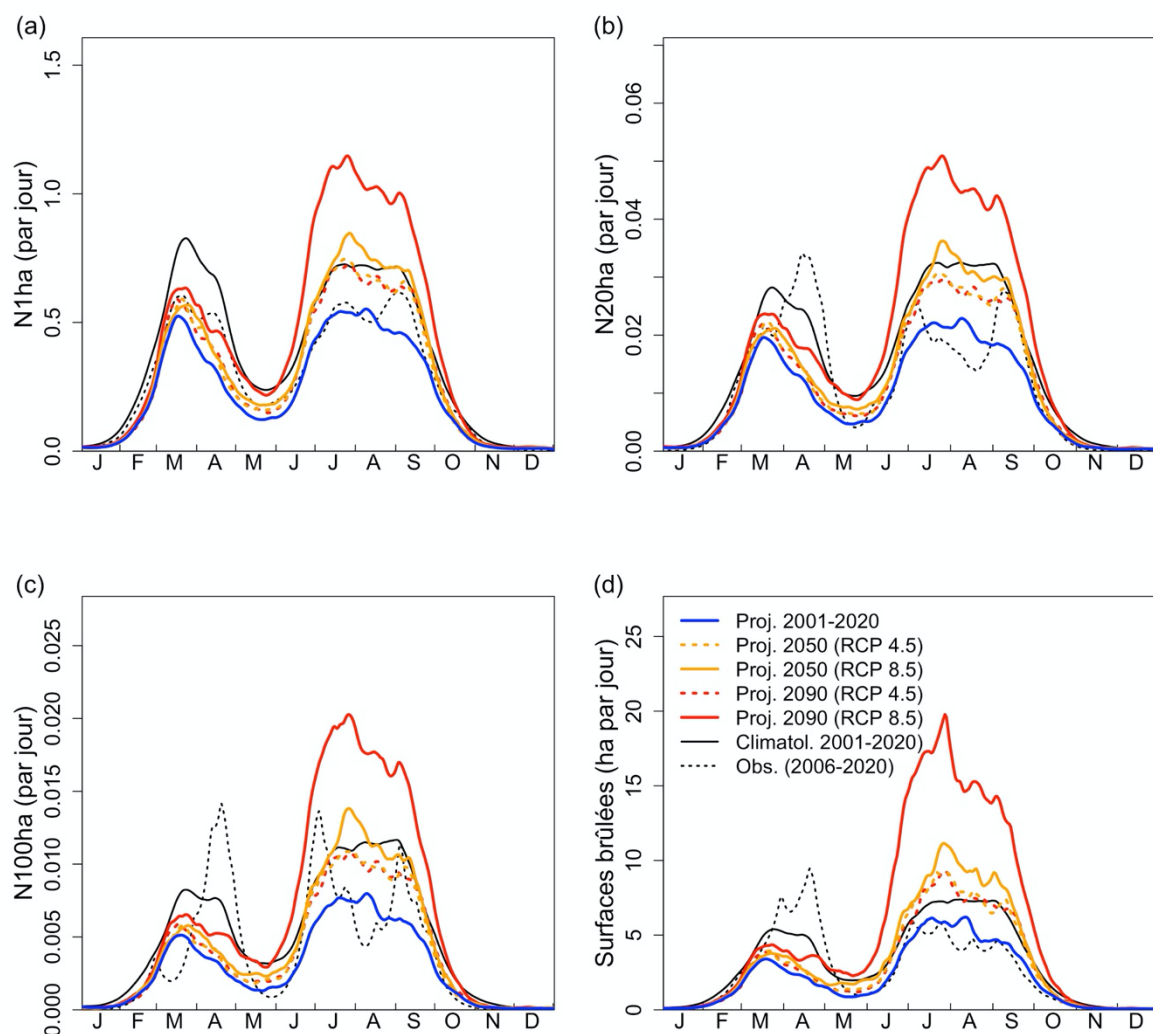


Figure 4.12. Activités des feux saisonnières moyennes pour différents horizons et scénarios pour **(a)** N1ha, **(b)** N20ha, **(c)** N100ha et **(d)** Surfaces brûlées. En noir, figurent les observations qui ont été filtrées avec un lissage à 7 jours pour les N1ha et 30 jours sur les autres métriques afin de gommer la variabilité très forte présente dans les observations Sud-Ouest entre 2006 et 2020.

Allongement de la saison de feu estivale

[Comme nous l'avons fait pour classer les pixels de la zone Sud-Ouest selon leur activité de feu, nous avons ici appliqué aux quatre métriques de l'activité journalière la même technique de *k-moyennes* à 5 niveaux pour classer les jours de la saison estivale selon leur activité de feu à l'échelle de la zone Sud-Ouest. Les résultats de cette classification sont présentés **Figure 4.13** pour le RCP 8.5 (et en **Annexe C Figure C.10** pour le RCP 4.5).]

Il en résulte que seulement 3 niveaux (faible à fort) sont observés dans la période de référence historique (2001-2020), les niveaux très forts et extrêmes émergeant respectivement en 2050 et 2090 sous RCP 8.5. En période historique, le risque « au moins modéré » s'étend du 26 février au 28 avril, puis du 11 juin au 3 octobre et peut être considéré comme représentatif des deux « saisons de feu ». Le risque fort s'étend du 26 juin au 13 septembre et correspond au « cœur de la saison de feu » estivale.

La longueur totale de la saison de feu passerait donc de 176 jours à 226 puis 235 jours sous RCP 8.5, avec fusion des deux périodes d'activité dès 2050. Le cœur de saison passerait de 80 à 134 jours en fin de siècle, dont une quinzaine de jours en mars.

[Ces allongements de saison de feu sont susceptibles d'induire fatigue accrue des personnels et usure prématurée des matériels impliqués et vont nécessiter une adaptation des dispositifs opérationnels.]

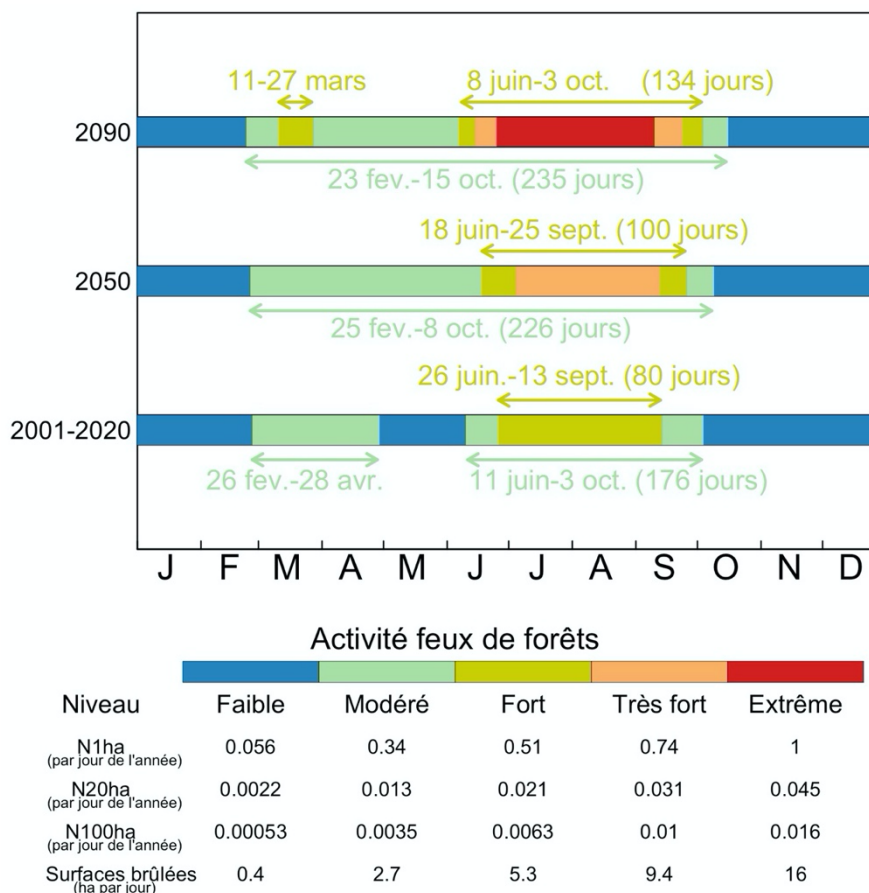


Figure 4.13. Évolution du niveau d'activité des feux journaliers selon le RCP 8.5 (même figure pour le RCP 4.5 disponible en Annexe C). Les périodes correspondant à un niveau au moins modéré et au moins fort s'allongent aux horizons 2050 et 2090.

Pour connaître la répartition précise de l'évolution en nombre de jours des différents niveaux, on peut consulter la **Figure 4.14**. On y voit en particulier que 77 jours seront à risque extrême en moyenne en 2090 sous RCP 8.5, suggérant une très forte intensification de l'activité au cœur de la saison.

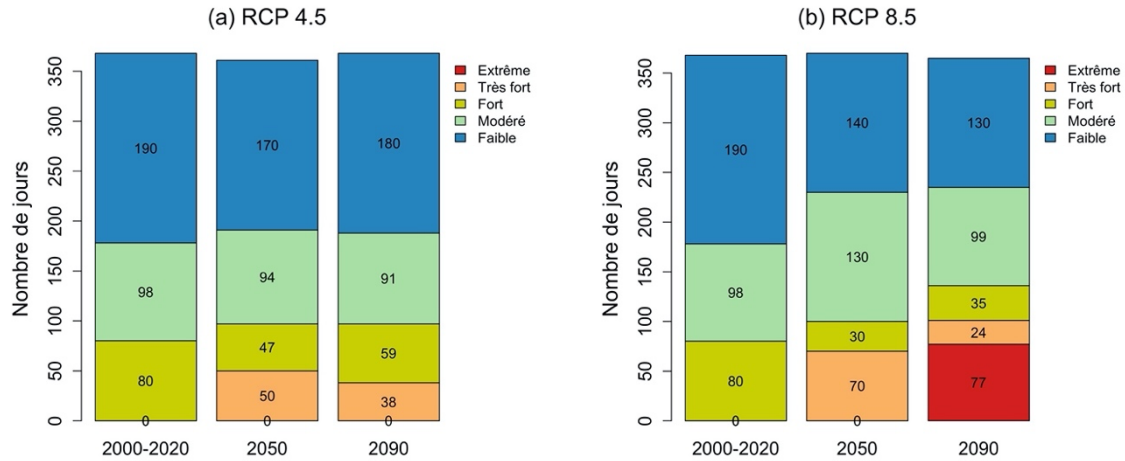


Figure 4.14. Distribution des différents niveaux de risque journaliers et de leur évolution à différents horizons, pour les scénarios 4.5 et 8.5. Il s'agit du nombre de jours de la période à un niveau donné.

Répartition des hausses de l'activité des feux entre le cœur et le reste de la saison de feu

On s'intéresse ici à la répartition de la hausse de l'activité des feux induite par le changement climatique (c'est-à-dire l'anomalie par rapport à 2001-2020) selon que l'on se trouve ou non dans le cœur de la saison historique, c'est-à-dire du 26 juin au 13 septembre (voir **Fig. 4.13**).

Ces anomalies sont présentées en **Figure 4.15** pour les N100ha. Environ 60 à 70 % des hausses d'activité induites par le changement climatique se dérouleront pendant cette période de 80 jours, les résultats étant sensiblement similaires pour les autres métriques (voir **Annexe C Figures C11, C12 et C.13**). En conséquence, l'augmentation de l'activité passera principalement par une intensification de la saison de feu estivale.

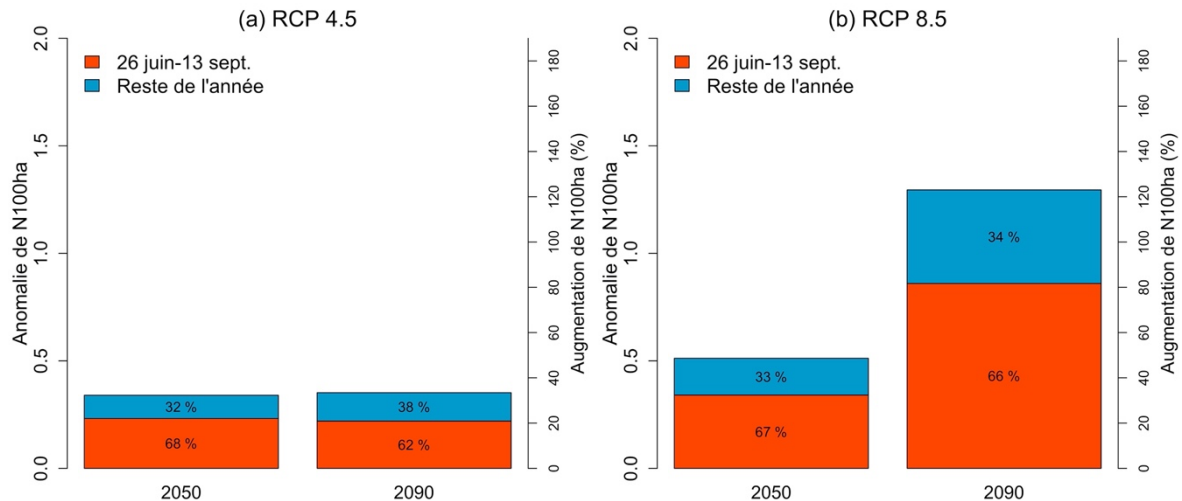


Figure 4.15. Anomalies de N100ha sous l'effet du changement climatique, distribuées par rapport à la zone à risque historique (2001-2020) en rouge, pour les scénarios 4.5 et 8.5.

4.4. Impact sur les dispositifs de prévention et de lutte

[Les projections peuvent être utilisées pour caractériser l'expansion, l'allongement et l'intensification des activités de feux, mais aussi d'autres caractéristiques spécifiques susceptibles d'influencer la lutte. Nous avons en particulier identifié la concomitance des événements de feu, ainsi que la proportion de grands feux, que nous quantifions ici.

De plus, en croisant les données d'activité future des feux avec des caractéristiques des services opérationnels, il devrait être possible de mieux planifier les besoins futurs. Cette partie pourra donc être enrichie en fonction des enjeux identifiés par les services concernés et des données disponibles. Il conviendra cependant d'intégrer aux analyses que les évolutions de l'activité projetée le sont compte tenu de l'action des services actuellement en place et supposent qu'ils maintiendront leur efficacité dans le futur (voir discussion au chapitre 5).]

Tendance sur les tailles de feux

On compare les augmentations prédites sous RCP 8.5 pour différentes tailles de feu de 1 à 100 ha et par rapport à l'IFM moyen estival (**Figure 4.16**). Contrairement à la zone Sud-Est, ce sont les surfaces brûlées qui augmentent le plus et non les feux de plus de 100 ha, illustrant peut-être un potentiel supérieur pour les très grands feux en zone Sud-Ouest du fait de la continuité du combustible. En revanche, ces augmentations seront a priori plus limitées qu'en zone Sud-Est.

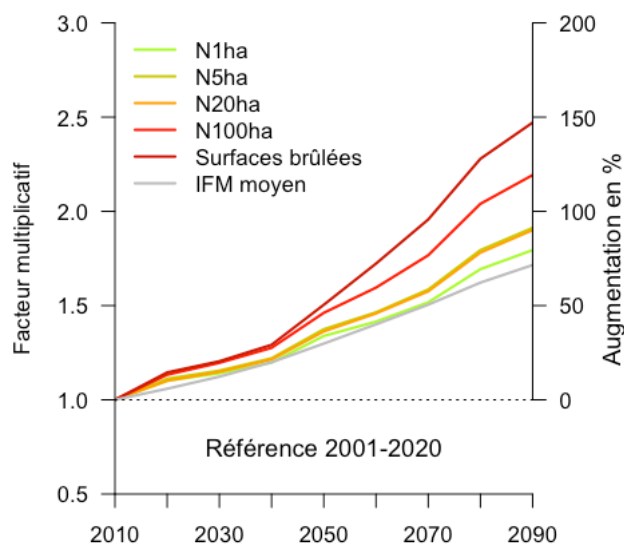


Figure 4.16. Évolution des feux selon leur taille sous RCP 8.5.

Ces augmentations des nombres de feu par catégorie de taille vont se traduire par une augmentation de la taille du feu moyen de 8.5 à 12.3 ha, mais aussi de la proportion de feux dépassant 100 ha, de 1.2 à 1.5 % à horizon 2090 sous RCP 8.5 (voir **Table 4.1**).

Table 4.1. Évolution des caractéristiques du feu moyen et de la proportion de grands feux (parmi les feux supérieurs à 1 ha)

	2001-2020	2050 RCP 4.5	2090 RCP 4.5	2050 RCP 8.5	2090 RCP 8.5
Taille du feu moyen (ha)	8.5	9.6	9.9	9.8	12.3
Pourcentage de feux supérieurs à 20 ha	3.9	4.0	4.0	4.0	4.2
Pourcentage de feux supérieurs à 100 ha	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5

4.5. Synthèse des analyses en zone Sud-Ouest

L'ensemble des projections pour la zone Sud-Ouest montrent une augmentation de l'activité moyenne des feux déjà marquée dès 2030 par rapport à la période historique 2001-2020, quel que soit le scénario, de +14 à +23 % selon les métriques. Dès 2050, le phénomène s'accroît, avec des différences qui apparaissent entre les scénarios (+34 à +50 % selon le RCP 8.5, contre +26 à +40 % selon le RCP 4.5). Au-delà de 2050, l'augmentation se stabilise dans le cas du RCP 4.5, alors qu'elle continue de progresser de manière exponentielle sous RCP 8.5, atteignant de +79 à +147 % en fin de siècle. C'est la métrique « surfaces brûlées » qui augmente le plus rapidement. On pourrait atteindre plus de 2 feux de plus de 100 ha par an en moyenne, contre moins de 1 en période de référence (**Fig. 4.1**).

On peut également estimer l'évolution de ces métriques lors des années extrêmes qui se produisent moins d'une fois par décennie, mais qui concentrent la majorité des dommages. On retrouve les mêmes patrons pour ces extrêmes que pour les tendances moyennes, même si les augmentations relatives sont moins importantes. Par exemple, les nombres de grands feux passeraient de 3.7 à 6 feux par an lors de ces années extrêmes, soit une augmentation de +64 %, contre +129 % pour les moyennes annuelles (**Fig. 4.3**). En termes de surfaces brûlées, le niveau de retour décennal correspond à environ deux fois le bilan moyen annuel, alors que les années extrêmes correspondent à cinq fois le bilan moyen, ce ratio étant largement supérieur à celui de la zone Sud-Est.

Les projections moyennes peuvent être spatialisées sous forme de cartes permettant de localiser la zone à risque principale et de quantifier l'intensification à l'intérieur de cette zone, ainsi que son expansion. Ces cartes sont calculées sur la grille SAFRAN de 8 km. La zone à risque, qui s'étend en période historique sur 24 % de la zone Sud-Ouest, atteindrait 35 % en 2050, puis 49 % en fin de siècle en RCP 8.5, soit une augmentation de 104 % (**Fig. 4.6**). Les territoires basculant dans la zone à risque principale se situeraient en particulier dans les 2/3 nord des Landes, en Dordogne, et dans une moindre mesure dans l'ouest du Lot-et-Garonne, sans expansion notable en Gironde, dont les massifs boisés sont déjà très largement à risque (**Fig. 4.7**). A la différence de la zone Sud-Est, plus de la moitié des feux de plus de 1 ha induits par le changement climatique devraient avoir lieu dans ces zones d'expansion (**Fig. 4.10**), nécessitant la mise en œuvre (ou le renforcement) d'une politique de prévention et de lutte permettant de faire face à l'émergence de nombreux feux de petite taille.

En revanche, comme en zone Sud-Est, l'intensification sera plus forte dans la zone à risque historique que dans ces territoires nouvellement concernés en ce qui concerne les feux de plus grandes tailles (N20ha et N100ha et les surfaces brûlées). Ainsi, environ 70 % des hausses d'activité des feux significatifs (> 20 ha) induites par le changement climatique vont avoir lieu dans la zone à risque historique (ex. **Fig. 4.11**). Une telle intensification va induire de plus grandes sollicitations des services opérationnels, qui auront davantage d'interventions concomitantes. Les interventions moyennes seront également un peu plus importantes, la proportion de grands feux (supérieur à 100 ha) parmi les feux ayant échappé (supérieur à 1 ha) passant de 1.2 à 1.5 % (**Table 4.1**).

L'augmentation du niveau de danger va aussi se traduire par un allongement de la période d'activité des feux présentant un niveau d'activité modérée à forte, cette période devenant continue entre la fin de l'hiver et le début de l'automne en 2050 et passant ainsi de 176 à

235 jours entre le 23 février et le 15 octobre (**Fig. 4.13**). L'activité des feux devrait cependant conserver ses deux pics de fin mars et début août, mais l'augmentation serait bien plus sensible en période estivale (**Fig. 4.12**). Le cœur de la saison estivale (niveau d'activité fort) passerait en moyenne de 80 jours (26 juin-25 septembre) à 100 jours en 2050 (18 juin-23 septembre), puis à 134 jours en 2090 sous RCP 8.5 (8 juin-3 octobre). Bien sûr, ces dates ne correspondent qu'à des indications moyennes (sur 20 ans), chaque saison de feu individuelle présentant une chronologie propre. Ces résultats illustrent cependant la nécessité d'allonger progressivement la période de mise en œuvre des dispositifs opérationnels, induisant une fatigue accrue des personnels impliqués, même si les 2/3 des activités engendrées par le changement climatique auront lieu pendant la période estivale (26 juin-13 septembre, **Fig. 4.15**).

Ces projections présentent des incertitudes importantes en raison du choix des modèles climatiques et de leurs divergences, mais aussi des hypothèses de modélisation, qui supposent que la relation entre l'activité des feux et l'IFM n'évoluera pas au cours du siècle. Or, compte tenu de l'ampleur des changements projetés, il est probable que celle-ci sera modifiée, en fonction de l'évolution des politiques de prévention et de lutte, mais aussi des dépérissements potentiels de la végétation et de changements d'usage des sols. Il s'agit donc de résultats de prospective purement liés aux effets du changement climatique sur l'humidité des combustibles et l'éclosion/propagation. Ils permettent cependant d'appréhender l'ampleur des changements attendus malgré ces incertitudes. On rappellera également que ces projections correspondent à des modèles climatiques sous-estimant les observations de la période 2001-2020 sur la zone Sud-Ouest, les données d'activité rapportées pouvant parfois donner l'impression que ces projections sont « en retard » sur les observations, notamment par rapport à la saison 2022³⁰, malgré l'ampleur des changements projetés.

³⁰ Même si des surfaces brûlées annuelles excédant 10 000 à 15 000 ha ne sont pas irréalistes, quoiqu'improbables, sur la climatologie de référence 2001-2020 (ex. **Fig. 4.4**)

5. Discussion des résultats des zones « Sud-Est » et « Sud-Ouest »

A l'échelle des zones Sud-Est et Sud-Ouest, le changement climatique devrait induire des changements très profonds dans l'activité des incendies de forêt, se traduisant par une expansion des zones à risque, par un allongement des saisons de feu, et par une intensification dans les zones les plus exposées historiquement ainsi que pendant le cœur de la saison de feu. Ces résultats, synthétisés pour chaque zone dans les sections 3.6 et 4.5 montrent l'importance de la mise en œuvre des scénarios de réduction d'émissions au niveau global, les impacts augmentant de manière exponentielle avec les degrés de réchauffement, comme on peut le voir sur la **Figure 3.3**.

Dans ce chapitre, nous discuterons trois points spécifiques. Dans un premier temps, nous ferons la synthèse des incertitudes (section 5.1). Ensuite, nous discuterons les enseignements qui peuvent être tirés des comparaisons entre les deux zones (section 5.2). Nous terminerons par des recommandations concernant les futures actualisations de ces travaux (section 5.3).

5.1. Limites et incertitudes

Incertitudes concernant les projections climatiques

Dans cette étude de projection, les niveaux d'activité restent soumis à des incertitudes importantes, en raison des choix de scénarios d'émissions, des différences entre modèles climatiques, de la stochasticité du climat et de l'activité des feux, fortement variables à l'échelle d'une ou deux décennies. Ces incertitudes, dont les poids relatifs sont étudiés en détails dans Pimont et al. 2023 (in prep), peuvent conduire à des sous-estimations importantes, comme par exemple celles que nous avons constaté dans nos projections pour les zones Sud-Est et Sud-Ouest en période historique³¹. Les causes potentielles de ces sous-estimations à partir des projections « CMIP5 » ont été largement discutés en section 2.1.

On notera que la nouvelle génération de modèles CMIP6 utilisée notamment dans le dernier rapport du GIEC présente une sensibilité climatique (i.e. réchauffement à la surface de la terre en réponse à un doublement de la concentration de l'atmosphère en CO₂) plus élevée que la génération CMIP5 précédente. Cette plus forte sensibilité se traduit par un réchauffement global plus important de l'ordre de 0.4°C d'ici la fin du siècle par rapport à des scénarios similaires issus de CMIP5. L'augmentation de l'activité des incendies présentée ici devrait donc être largement amplifiée avec l'utilisation de cette nouvelle génération de modèles globaux. De plus, des travaux récents (Ribes et al., 2022) ont montré que le réchauffement dans les sorties de modèles climatiques était bien plus fort lorsque celles-ci sont « forcées » par les tendances observées régionalement et globalement. Cette approche, combinant observations et simulations, prévoit des niveaux de réchauffement en France d'ici la fin du siècle allant de 5.2 à 8.2°C, bien au-delà des niveaux de réchauffement considérés dans notre étude. Ces derniers éléments illustrent le niveau d'incertitude très

³¹ les simulations issues de *Firelihood* s'accordent bien avec les observations lorsqu'on réalise les calculs à partir du climat réellement observé en période historique, mais sous-estiment celles-ci lorsque on utilise le climat projeté.

élevé qui porte sur les projections climatiques, et que les simulations présentées dans le présent rapport correspondent probablement à des projections relativement optimistes, malgré l'ampleur des changements prédits sur les activités de feux. Ces augmentations, qui dépassent parfois le triplement, sont suffisamment marquées pour « émerger » des incertitudes³², en particulier à la fin du siècle sous scénario RCP 8.5.

Dans ce rapport, on s'attache à proposer des trajectoires d'évolutions plausibles au travers des moyennes multi-modèle dans un contexte prospectif. Il convient toutefois de rappeler que les modèles climatiques les plus pessimistes de CMIP5 peuvent conduire à des projections plus de deux fois supérieures à la moyenne multi-modèle (voir par exemple Fig. 2.3 et 2.4) et que les projections des prochaines campagnes seront probablement plus pessimistes encore.

Incertitudes sur les régimes de feux de référence

Au-delà de ces incertitudes sur le climat futur, un certain nombre d'éléments suggèrent aussi que nos résultats, fondés sur une relation feu-climat établie grâce à l'IFM sur le passé récent, pourraient sous-estimer les évolutions futures. D'abord, nos périodes historiques de référence pour les régimes de feux (2004-2019 pour la zone Sud-Est et 2006-2020 pour la zone Sud-Ouest) ont été choisies, car elles sont représentatives de l'activité récente présentant une relation feu-climat plutôt stable jusqu'en 2021. Cependant, dans le cas de la zone Sud-Est, elle correspond également au meilleur ratio (le plus bas) activité du feu/danger météo des quarante dernières années, du fait des améliorations successives de l'efficacité des politiques de prévention et de lutte. Si nous avions choisi 1993-2003 comme référence d'activité des feux, qui précède donc les mesures postérieures à la crise de 2003, l'ensemble des activités de feux présentées dans l'étude auraient été multipliées par deux (et par 4 avec la période 1985-2004, voir par exemple Amatulli et al. 2013). La situation est encore plus complexe en zone Sud-Ouest, pour laquelle on ne dispose pas de données exhaustives avant 2006, et où la saison 2022 vient bouleverser les références établies, avec une année totalement hors normes. Cette saison 2022 n'a pas pu être prise en compte dans la présente étude dans l'ajustement des modèles probabilistes, car les données météorologiques n'étaient pas disponibles au moment de la mise en œuvre du travail. Bien que cela n'ait pas pu être vérifié, il est possible que la relation feu/climat y ait été significativement modifiée. Ceci concerne notamment dans les Landes qui présentent un nombre de feux significatifs et de grands feux particulièrement élevés³³, en particulier dans le Sud du département, au regard de la cartographie de la zone à risque présentée en **Fig. 4.6**. On notera également que les travaux de modélisation proposés dans cette étude suggèrent que la période de retour de telle saison extrême pourrait être longue (voir par ex. section 5.2).

Cette variabilité des niveaux de référence encourage à privilégier une approche par niveau de risque, comme celle utilisée dans l'étude, ou d'exprimer les résultats en pourcentage d'augmentation par rapport à une référence historique, même si les nombres de feux ou surfaces brûlées projetés sont malgré tout utiles pour évaluer les conséquences pratiques sur les dispositifs de prévention et de lutte.

³² En climatologie, l'émergence est un concept se rapportant au moment où l'augmentation de la tendance liée au changement climatique anthropique excède les variations interannuelles ou décennales liées aux fluctuations naturelles du climat.

³³ 7 feux de plus de 20 ha, dont 5 excédant 100 ha (Source ONF).

Incertitudes sur les hypothèses de modélisation

Ces variations dans les prédictions illustrent également l'amplitude des incertitudes liées aux facteurs humains (éclosions, prévention, lutte), tout en mettant en évidence les conséquences potentielles d'une diminution de l'efficacité des services de prévention et de lutte. D'autres facteurs liés aux activités humaines et en particulier aux pressions d'allumage de feux et des actions de prévention et de lutte, et aux changements dans la végétation, dont les évolutions sont difficiles à anticiper, ajoutent également de l'incertitude sur les scénarios présentés dans cette étude.

Une autre source de sous-estimation potentielle concerne les très grands feux qui se déroulent sur plus d'une journée. En effet, notre approche de modélisation probabiliste s'appuie uniquement sur l'IFM du jour du départ du feu pour modéliser la distribution de tailles possibles. Elle ne prend pas en compte l'augmentation du nombre de journées consécutives défavorables, ni l'affaiblissement important de la « barrière nocturne », souvent mise à profit par les services opérationnels pour éteindre les incendies d'ampleur à la faveur des remontées d'humidité relative pendant la nuit (Balch et al. 2022). Ces deux facteurs vont favoriser la survenue d'évènements de grande ampleur sur plusieurs jours, usant durablement les matériels et les personnels mobilisés massivement sur quelques théâtres d'ampleur. Ces évènements restant relativement rares en France, cette hypothèse de modélisation est probablement acceptable en première approche, mais une prise en compte des conditions météorologiques postérieures au départ de feu (conditions nocturnes suivantes, conditions moyennes des jours suivants) pourrait permettre d'affiner les résultats (Abatzoglou & Kolden 2010 ; Stavros et al. 2014).

Avec le modèle *Firelihood* de la présente étude, Pimont et al. (2021) ont montré que la prédictibilité des nombres de feux était assez bonne à l'échelle saisonnière jusqu'à des tailles de feux assez importantes en zone Sud-Est (> 100 ha). En revanche, les surfaces brûlées constituent une métrique très « stochastique » de l'activité des feux, très sensible à l'activité d'un ou deux feux à l'été³⁴, qu'il est évidemment illusoire de vouloir prédire « de manière déterministe » à partir des données météorologiques. En conséquence, les projections de métriques comme les feux qui échappent N1ha, les feux de taille intermédiaires N20ha ou les grands feux N100ha sont jugées plus robustes que celles des surfaces brûlées ou des très grands feux, même si les tendances en termes de surfaces brûlées, moyennes ou extrêmes, fournissent des informations importantes.

Plusieurs facteurs suggèrent qu'à moyens constants, une diminution de l'efficacité des politiques actuelles devrait survenir sous un climat futur plus favorable au feu. D'abord, l'expansion va porter le feu dans des territoires moins dotés et moins acculturés au risque incendie. Ensuite, l'allongement de la saison et la concomitance des évènements pourraient réduire la capacité des services à limiter le nombre de feux de 1 ha et à lutter en parallèle contre davantage d'évènements plus importants, avec des feux dépassant plus fréquemment les 100 ha, voire les 1000 ha. Enfin, d'autres régions de France ou d'Europe seront touchées par l'intensification, limitant les possibilités de réallocation de renforts externes durant les périodes extrêmes synchrones, comme déjà observé aux Etats-Unis (Abatzoglou et al., 2021). Ces effets d'interactions entre le changement climatique et les moyens de lutte ne sont pas pris en compte dans les calculs de la présente étude, avec de

³⁴ Comme le feu de Gonfarron en 2021 dans le Var ou les trois feux >5000ha de Gironde en 2022.

potentiels effets de seuil concernant la dégradation de l'efficacité des actions de lutte, conduisant à davantage de développements de feux catastrophiques.

A ces facteurs liés à l'augmentation du danger météorologique s'ajoutent des évolutions possibles qui dépassent le cadre de l'étude présente mais pourront aussi affecter l'aléa et l'efficacité des politiques de prévention et de lutte, notamment :

- le risque d'observer des dépérissements forestiers massifs aggravant temporairement le risque d'incendie (matériel mort), la poursuite de l'urbanisation (éclosions des feux, défendabilité, multiplication des enjeux à protéger) ou de la déprise agricole (accumulation et plus forte continuité de combustible).
- la raréfaction du combustible, qui à l'inverse pourrait réduire la propagation des feux, mais beaucoup d'incertitudes demeurent. Cette tendance, causée par une activité de feu croissante et/ou liée à des conditions de sécheresse de plus en plus contraignantes pour la croissance et la régénération des plantes, conduisant à terme à une végétation « éparse » typique des milieux arides, est souvent mentionnée dans la littérature scientifique dans des climats plus arides que la France. De plus, certaines études n'excluent pas la possibilité d'une désertification causée par le stress hydrique dans le sud de la France en fin de siècle, indépendamment des incendies. Toutefois, on peut s'attendre dans un premier temps à des changements de structure de végétation, avec des couverts moins hauts, voire sans arbres (matoralisation déjà évoquée), mais conservant une bonne continuité horizontale de combustible tout en offrant une moindre résistance au vent, et par conséquent plus favorables à la propagation des feux.

Incertitudes liées aux politiques de prévention et de lutte

L'analyse rétrospective de l'activité des incendies offre aussi quelques éléments supplémentaires d'interrogation quant à l'efficacité des politiques publiques, et notamment de lutte, dans le futur. Si les grands feux représentent l'essentiel des surfaces brûlées, c'est avant tout la réduction du nombre de feux de plus d'un hectare qui a permis la diminution des surfaces brûlées totales au cours des dernières décennies en zone Sud-Est. En effet, aucun progrès significatif n'a été statistiquement détecté, à l'échelle de la zone Sud-Est, dans la capacité à limiter les surfaces parcourues pour des feux ayant dépassé ce seuil de 1 ha, ce qui montre que c'est en limitant les éclosions par la prévention (information, réglementation, etc.) et en améliorant l'attaque sur feux naissants par la prévention et la lutte que les politiques publiques ont construit leur efficacité. De plus, les analyses statistiques ne détectent plus de progrès significatif au cours des 14 dernières années, y compris sur la tendance des feux de plus de 1 ha, (Castel-Clavera et al. 2022). Néanmoins, la période de retour des très grands feux n'a pas significativement augmenté au cours des dernières années (Evin et al. 2018). Il convient enfin de signaler un point de vigilance qui montre à nouveau les limites éventuelles des politiques actuelles. L'amélioration du ratio activité des feux / danger météorologique a été très contrastée au sein de la zone Sud-Est, avec une amélioration très importante à l'Est du Rhône et en Corse, mais au contraire une augmentation de l'activité sur l'Ouest du bassin. Plusieurs causes peuvent être évoquées pour expliquer cette dégradation à l'Ouest, qui ne s'explique pas uniquement par

l'augmentation du danger³⁵. D'abord, les conséquences de la déprise agricole en matière de combustibilité des milieux sont souvent mises en avant par les acteurs locaux, même si une attribution formelle du rôle de la déprise dans l'augmentation n'a jamais été conduite à notre connaissance. Ensuite, il est possible que les moyens mis en œuvre dans la partie Ouest de la zone Sud-Est se soient avérés insuffisants pour maintenir l'efficacité atteinte lors de la période d'avant 2003, dans un contexte de danger estival accru d'environ 20 %. Comme évoqué au paragraphe précédent, il est probable que le nombre très important de feux observés dans le sud du massif landais, au regard des bilans précédents, illustre également l'impossibilité à maintenir l'efficacité avec les moyens actuels dans ce contexte de danger accru.

5.2. Comparaison entre les zones Sud-Est et Sud-Ouest

Les deux études menées aux chapitres 3 et 4 permettent une comparaison objective des activités de feux des zones Sud-Est et Sud-Ouest, pourtant très contrastées et de superficies bien différentes³⁶, grâce à l'utilisation de méthodologies et de sources de données similaires sur les deux zones étudiées. En effet, si les effets attendus du changement climatique sur les activités de feux sont très importants pour les deux zones, avec intensification, expansion spatiale et allongement saisonnier, il existe cependant quelques différences significatives.

D'abord, le niveau de danger estival moyen est nettement plus élevé en zone Sud-Est qu'en zone Sud-Ouest (par exemple IFM12 en période historique, **Fig. 2.1**). En dehors de l'activité des feux de 1 ha particulièrement élevée en zone Sud-Ouest, les niveaux d'activités sont plus élevés en zone Sud-Est³⁷ : en effet, lorsque l'on classe ces activités de faible à fort et extrême selon les seuils retenus en zones Sud-Est, seulement 6 % de la zone Sud-Ouest est classée comme modérée (**Fig. 4.7**), contre 27 % en zone Sud-Est, alors que seuls les feux estivaux ont été considérés en zone Sud-Est (**Fig. 3.7**). En prenant en compte les différences de superficies entre les deux zones, ceci se traduit par une densité de grands feux > 100 ha environ 3 fois plus élevée en zone Sud-Est pour la climatologie 2001-2020. On notera que l'étude « France entière » présentée au chapitre suivant montre, qu'à IFM égal, sensibilité et couvert de végétation égaux, l'activité des feux de plus de 20 ha est comparable entre la zone Sud-Ouest et la façade Ouest de la zone Sud-Est, alors que la façade Est de la zone Sud-Est présente des activités de l'ordre de deux fois moins élevées (**Fig. 6.2d**). Ces différences s'expliquent probablement en raison de différences régionales entre activités humaines, dont les taux de mises à feu ou l'efficacité³⁸ de la prévention et de la lutte.

En matière de projections, les augmentations relatives des métriques d'activité des feux sont similaires sur les deux zones jusqu'en 2030, mais l'augmentation sous l'effet du changement climatique est ensuite plus rapide en zone Sud-Est, amplifiant ainsi les différences initiales, avec par exemple une densité de grands feux plus de 4 fois supérieure

³⁵ A niveau de danger égal, l'activité des feux est plus importante que sur la période précédente dans de nombreuses parties de l'ouest de la zone Prométhée.

³⁶ 75000 km² pour la zone Sud-Est et 34000 km² pour la zone Sud-Ouest.

³⁷ Hors saison 2022.

³⁸ Prise ici au sens général de la capacité des politiques publiques à empêcher que des feux se propagent, sans jugement porté sur la répartition des moyens existants ou l'efficacité de tel ou tel service.

en zone Sud-Est à la zone Sud-Ouest en fin de siècle sous RCP 8.5. Toujours lorsque l'on utilise les mêmes seuils d'activité, la zone à risque concernerait en fin de siècle sous RPC 8.5 64 % de la zone Sud-Est, contre 49 % de la zone Sud-Ouest.

Malgré ces éléments, nos études soulignent que le potentiel pour le développement de très grands feux et de bilans annuels exceptionnels est très élevé en zone Sud-Ouest, lors des saisons extrêmes. En effet, contrairement à la zone Sud-Est dans laquelle les surfaces brûlées et le nombre de très grands feux progressent moins vite que le nombre de feux de 100 ha, ce sont les surfaces brûlées qui devraient progresser le plus rapidement en zone Sud-Ouest. La forte continuité de combustibles très sensibles au feu sur une grande étendue que présentent les forêts landaises pourrait expliquer cette différence. De plus, si les surfaces brûlées correspondant à un retour décennal sont de l'ordre de deux fois le bilan annuel moyen pour les deux zones, la zone Sud-Ouest présente des surfaces brûlées annuelles extrêmes présentes et futures de l'ordre de cinq fois supérieures au bilan annuel, alors que ces valeurs extrêmes sont plutôt de l'ordre du triple du bilan moyen en zone Sud-Est et que ce ratio devrait légèrement décroître en zone Sud-Est. Ainsi, les surfaces brûlées des années extrêmes pourraient représenter 13 fois le bilan moyen de la période historique en zone Sud-Ouest, contre 6.5 fois en zone Sud-Est.

Cette différence importante, qui concerne à la fois la période historique et le futur, suggère la présence d'années présentant des bilans exceptionnellement élevés à basse fréquence (avec des périodes largement supérieures à 10 ans), qui ne sont pas sans faire écho aux feux de 2022, sans précédent depuis les années 1940. Ces éléments pourraient s'expliquer par deux raisons. D'abord, les années « météorologiquement » extrêmes du point de vue du danger incendie sont potentiellement moins fréquentes en zone Sud-Ouest qu'en zone Sud-Est, qui est plus régulièrement touchée par les sécheresses estivales. Ensuite, la stochasticité de la relation feu/climat -c'est-à-dire l'écart entre les activités de feux les plus défavorables et l'activité moyenne attendue pour une météorologie annuelle donnée- semble plus importante en zone Sud-Ouest qu'en zone Sud-Est, comme le suggère une comparaison visuelle entre les **Fig. 4.4** et **Fig. 3.4**. Ces éléments devront faire l'objet de futures recherches. Au-delà de ces hypothèses, les éléments factuels de l'étude suggèrent que des saisons extrêmes tels qu'observées en 2022 dans le Sud-Ouest devraient rester exceptionnelles, malgré les effets du changement climatique et que le potentiel d'intensification est plus élevé en zone Sud-Est, conformément à l'évolution projetée du niveau de danger (Fargeon et al. 2020).

5.3. Préconisations pour de futures actualisations

Cette actualisation des études de 2010 -réalisée avec un seul modèle climatique et des croisements entre indice de danger et sensibilité de la végétation- bénéficie entre autres des avancées scientifiques réalisées notamment au travers de la thèse d'Hélène Fargeon, financée par le CGAER avec pour objectif appliqué de faire progresser les connaissances scientifiques en matière de projection du risque incendie. Le présent rapport démontre que les nouvelles méthodes probabilistes permettent maintenant de répondre à plusieurs questions concrètes comme l'ampleur de l'expansion, l'allongement des saisons de feux, les saisons extrêmes, etc. Les connaissances scientifiques vont continuer de progresser dans les années à venir avec plusieurs thèses et autres travaux de recherches portant sur

ces questions. Il conviendra donc d'intégrer ces avancées dans les futurs travaux d'actualisation, en ce qui concerne par exemple l'amélioration des indices de danger, la modélisation des feux d'hiver en zone Sud-Est, les périodes de retour des événements extrêmes, l'attribution d'évènements au changement climatique, les points de basculement éventuels liés aux évènements de feux concomitants, et les trajectoires à long terme concernant l'évolution des couverts végétaux (changements de composition et de structure sous l'influence de multiples facteurs), etc.

La prise en compte d'années particulières, comme par exemple la saison 2022 en zone Sud-Ouest, à la fois dans les ajustements de modèles, mais aussi dans l'analyse de leur spécificité permettra assurément de réduire les incertitudes et de faire progresser la connaissance. Les nouvelles projections climatiques devront aussi être prises en compte (arrivée des projections régionales de CMIP6 notamment), les modèles et la situation de la planète évoluant rapidement. Cependant, il conviendra de laisser suffisamment de temps pour que les données puissent être collectées et que les analyses puissent être produites. Par exemple, les évènements de 2022 n'ont pas pu être pris en compte dans l'étude INRAE, faute de données météorologiques disponibles pour l'ensemble de la saison estivale au moment de l'étude. Autrement dit, une mise à jour régulière des cartes serait utile, mais devrait être planifiée en prenant en compte le calendrier de production de nouvelles données/méthodes.

Un dernier enjeu concerne également l'amélioration de la complétude des bases de données pour des études nationales. En effet, faute de base de données de feux exhaustives disponibles en dehors des zones Sud-Est et Sud-Ouest, INRAE n'a pas construit de modèle probabiliste « France entière », malgré l'intérêt de certains acteurs. Un modèle simplifié a cependant été développé et permet de proposer des projections du nombre de feux estivaux de plus de 20 ha sur l'ensemble du territoire national (voir chapitre 6).

6. Étude complémentaire « France entière » sur les feux > 20 ha

L'étude qui suit complète les travaux précédents portant sur les zones Sud-Est et Sud-Ouest. Ils sont issus des projections climatiques réalisées à partir des données DRIAS-2020 de Météo-France et d'un modèle d'activité des feux > 20 ha, développé par INRAE et l'ONF dans le cadre de travaux pour la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires.

6.1. Présentation succincte de la méthodologie

L'occurrence est déterminée à partir d'un modèle probabiliste qui estime les nombres de feux estivaux annuels en fonction d'une métrique du danger incendie calculée à partir de l'IFM et de la sensibilité brute de la végétation, cartographiée par l'ONF. Ce modèle peut être vu comme une version simplifiée des modèles Firelihood utilisé dans les études précédentes, prédisant uniquement le nombre de feux saisonnier > 20 ha, et non l'ensemble des activités > 1 ha (y compris les surfaces brûlées) à l'échelle journalière.

Le modèle « France entière » a été ajusté à partir d'une base de données mixtes couvrant la période 2008-2020 et combinant bases de données nationales et régionales, et les contours issus de données satellitaires réanalysées. Il inclut un effet spatio-temporel qui permet de prendre en compte le fait, qu'à IFM et sensibilité brute égales, les activités de feux ne sont pas homogènes à l'échelle du territoire national, en raison de différences régionales dans les activités humaines, qui déterminent la plupart des éclosions, la prévention et la lutte et affectent la structure du paysage.

Une des difficultés principales pour une extension « France entière » de l'approche *Firelihood* tient au fait qu'il n'existe pas de données nationales, recensant les feux, leurs dates, leurs tailles et leurs positions de manière fiable et systématique sur une période longue. INRAE et l'ONF ont constitué une base des feux estivaux (fin mai-début novembre) > 20 ha, la plus homogène possible, en réunissant la BDIFF, la base du GIP ATGeRi, la base Prométhée, ainsi que différents contours de feux > 20 ha (comprenant au moins 10 ha de forêts ou landes), reconstruits par l'ONF à partir de différentes sources de données dont des produits satellitaires (bases de données EFFIS, FRY³⁹, Globfire⁴⁰). Des travaux de comparaison des données EFFIS aux bases de données nationales là où celles-ci sont fiables ont également permis d'estimer le taux de sous-détection des feux hors zones Sud-Est et Sud-Ouest, ce qui a permis de le corriger dans l'estimation du modèle. Au total, nous disposons de 35 feux en zone Sud-Ouest (en incluant les Pyrénées-Atlantiques) selon le GIP

³⁹ Laurent, P., Mouillot, F., Yue, C. et al. FRY, a global database of fire patch functional traits derived from space-borne burned area products. *Sci Data* 5, 180132 (2018).

⁴⁰ Ces produits « globaux » s'appuient sur une détection de « points chauds » en infrarouge thermique à environ 250 m de résolution, complétée par une analyse de changement temporel de réflectance liés à la consommation et au dessèchement du combustible pour déterminer des contours potentiels. Ils sont peu fiables en termes de surface pour les feux < 100 ha, mais l'ONF les a simplement utilisés comme « alerte » pour rechercher les feux hors zones Sud-Est et Sud-Ouest. Pour chaque feu avéré, le contour -et donc la position et la surface précise- a ensuite été déterminé grâce à de l'image-interprétation (images Landsat 4-5 TM pour la période 2001-2012 (et plus marginalement des images Landsat 7 ETM +), images Landsat 8-9 pour la période 2013-2015 et images Sentinel 2 pour la période 2016-2020).

ATGeRI, 325 dans les quinze départements de la zone Sud-Est selon Prométhée et 59 feux en dehors de ces deux zones (**Annexe D, Fig. D1**), pour lesquels on dispose d'une estimation du taux de sous-détection.

La probabilité d'occurrence des feux > 20 ha est estimée pour l'ensemble de la saison estivale et sur une grille de 8 km de côté, en fonction :

- Du danger météorologique saisonnier, estimé à partir de l'IFM quotidien calculé sur la période 2001-2020, grâce à la réanalyse climatique SAFRAN ;
- De la sensibilité brute de la végétation au feu, cartographiée par l'ONF à la demande du MASA sur l'ensemble de l'hexagone et en Corse en 2021 et mise à jour en janvier 2023 ;
- D'autres facteurs non explicites (suppression des feux, usages, etc) sont pris en compte à travers des modèles spatio-temporels permettant de quantifier et prendre en compte des différences interrégionales.

La **Figure 6.1** illustre l'apport successif des différentes variables aux estimations faites par le modèle : **(a)** IFMx, **(b)** IFMx et sensibilité brute de la végétation, **(c)** IFMx, sensibilité brute de la végétation et un effet spatial. Contrairement aux modèles « Firelihood » existants sur les zones Sud-Est et Sud-Ouest, ces modèles hexagonaux sont annuels, en raison notamment des incertitudes portant sur la date précise des feux. Ils s'appuient donc sur un indice de danger saisonnier. Différents indices de danger saisonniers⁴¹ ont été comparés et évalués à partir de métriques statistiques spécifiques (log-loss skill score notamment). La moyenne estivale de l'IFM « jour » s'est avérée être l'indice le plus performant pour expliquer l'activité estivale des feux de plus de 20 ha, suivi de l'IFMx en moyenne estivale (voir **Annexe D, Table D1**). Les projections d'IFM « jour » n'étant pas disponibles dans DRIAS 2020, nous avons utilisé l'IFMx comme métrique du danger dans la présente étude.

Afin d'évaluer les différences entre les simulations du modèle « France entière » et celles des modèles Firelihood complets utilisés les chapitres 3 et 4 du présent rapport, on pourra comparer la **Fig. 6.1c** avec la **Fig. 6.1d**, qui présente dans chaque zone les simulations Firelihood en zones Sud-Est et Sud-Ouest. On constate que les patrons spatiaux et les ordres de grandeur y sont comparables, même si certaines différences sont visibles dans la distribution spatiale des densités de feux, qui ont tendance à être plus lissées spatialement avec les modèles détaillés (**Fig. 6.1c**) que dans les modèles Firelihood (**Fig. 6.1d**). Ceci concerne en particulier les départements des Landes et de la Gironde pour lesquelles les différences observées avec Firelihood ne sont pas reproduites avec le modèle « France entière », mais aussi la Dordogne qui présente une activité plus homogène avec le modèle « France entière ». Les différences semblent moins marquées en zone Sud-Est, même si l'activité des feux est là aussi plus lisse avec le modèle « France entière », notamment dans le nord du Gard et dans le sud de la Corse. Ces différences s'expliquent notamment par les différences de modèles d'effet spatial, plus lisse dans le modèle « France entière » (voir paragraphe qui suit). Les modèles Firelihood locaux sont a priori plus précis, car ils prennent en compte à plus haute résolution les variations d'activités des feux > 1 ha, mais il n'a malheureusement pas été possible de les construire sur l'ensemble du territoire national en raison du manque de données fiables.

⁴¹ IFM jour, 12 et max ont été comparés, agrégés en moyenne estivale ou en nombres de jours de dépassement de différents seuils.

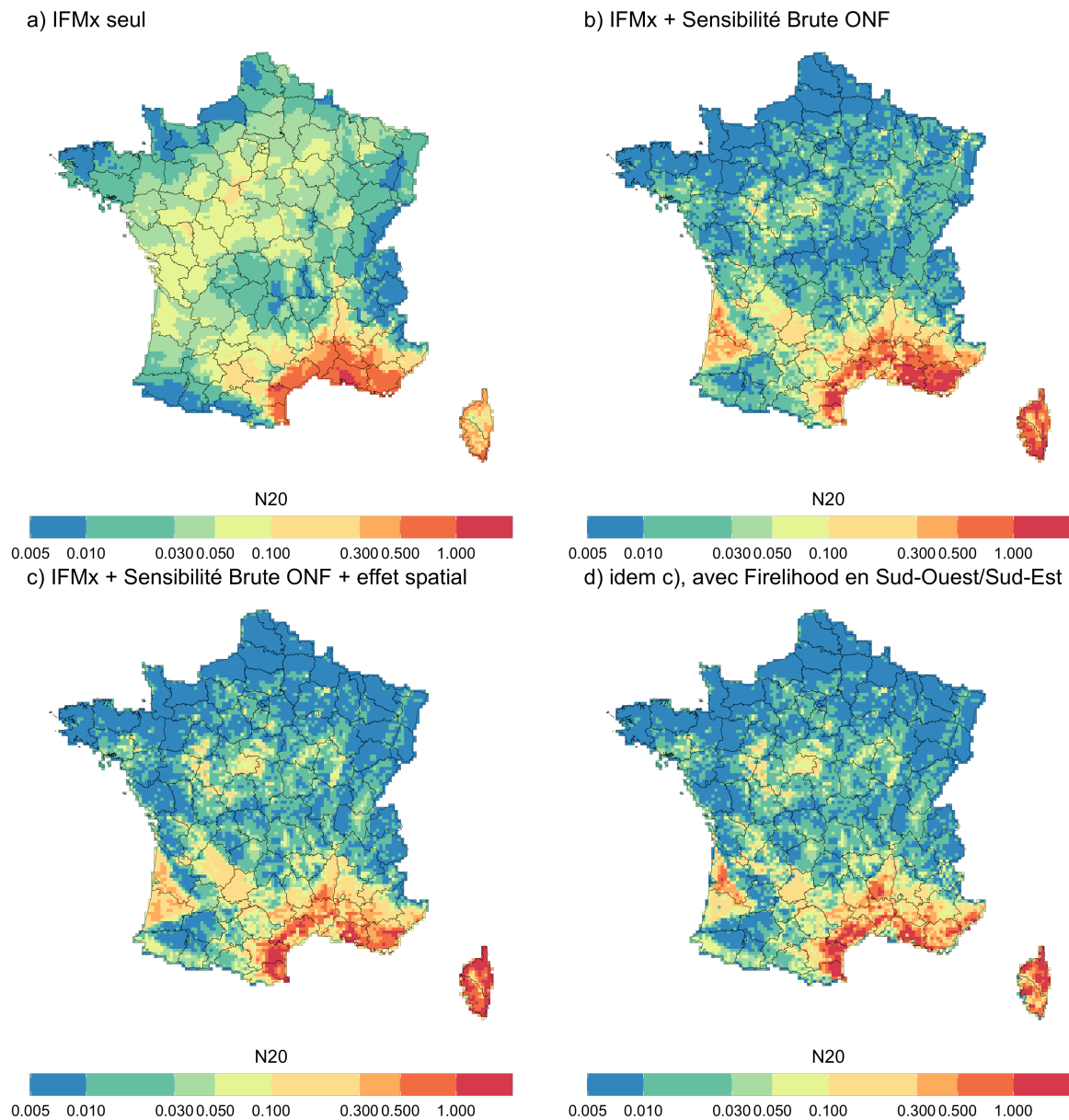


Figure 6.1. Densité de feux de plus de 20 ha pour la climatologie 2001-2020 en nombres de feux par pixels de 8 km sur la grille SAFRAN. Les zones en rouge correspondent à celles où l'on attend plus d'un feu par pixel sur une période de 20 ans, alors qu'il y a moins d'une chance sur 100 d'observer un feu dans le pixel pour les zones en bleu. **(a)** Le premier modèle utilise uniquement l'IFM journalier comme variable explicative ; **(b)** Le second combine cette information avec la sensibilité brute de la végétation de l'ONF et la couverture forestière ; **(c)** Le troisième utilise en plus des variables précédentes un effet spatial permettant de corriger le fait qu'à IFM égaux et sensibilités brutes égales, l'occurrence des feux peut varier à l'échelle du territoire national selon les régions ; **(d)** Le quatrième est identique à **(c)**, sauf en

zones Sud-Est et Sud-Ouest dans lesquelles les modèles *Firelihood* locaux ont été utilisés pour calculer la densité de feux attendue à titre de comparaison.

Afin de mieux expliciter le fonctionnement de ces modèles, la **Fig. 6.2** présente les réponses du nombre de feux > 20 ha aux différentes variables explicatives du modèle « France entière ».

Les **Fig. 6.2abc** montrent par exemple qu'il y a 100 fois plus de feux de 20 ha lorsque l'IFM moyen saisonnier vaut 40 que lorsqu'il vaut 5, qu'il y a presque 4 fois plus de feux dans un pixel 100 % forestier (64 km²), que dans un pixel présentant seulement 20 km² de forêt, ou encore qu'il y a 40 fois plus de feux lorsque la végétation présente une sensibilité brute de 5 par rapport à une sensibilité brute de 1.

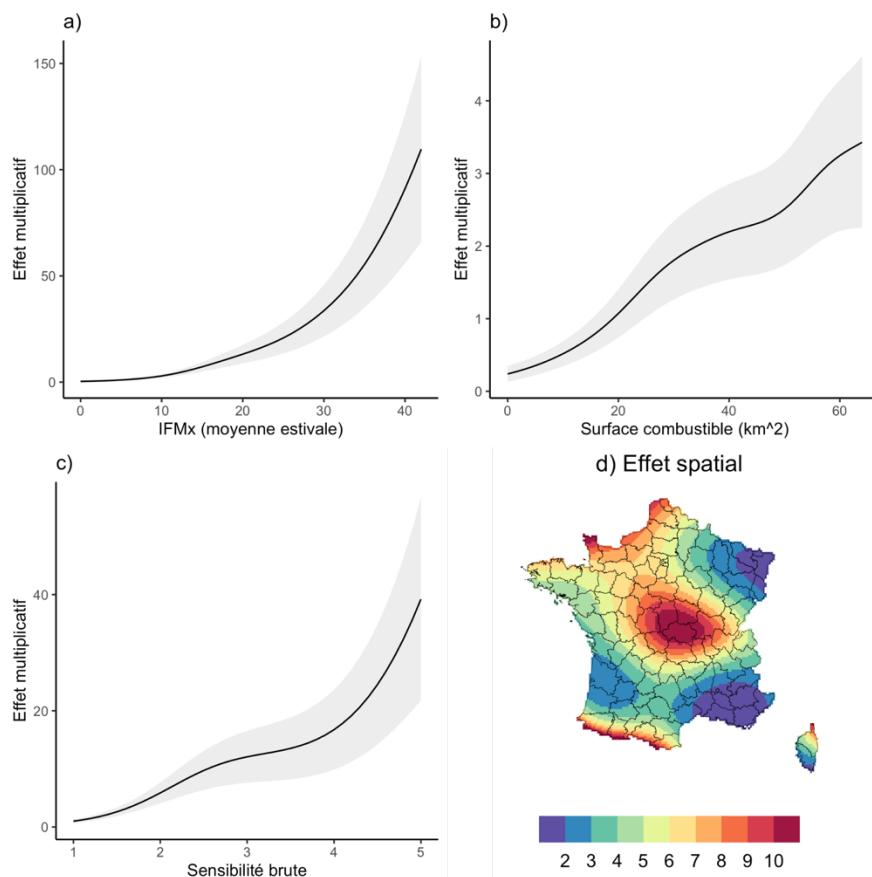


Figure 6.2. Réponses du nombre de feux estivaux > 20 ha dans le modèle « France entière » à **(a)** l'IFMx moyen saisonnier, **(b)** la couverture forestière, **(c)** la note de sensibilité brute de la végétation de l'ONF et **(d)** à la position sur le territoire national (effet spatial). L'axe des ordonnées indique un effet multiplicatif attendu sur la densité de feux par rapport à un niveau de référence à 1. Par exemple, il y a 100 fois plus de feux de 20 ha lorsque l'IFMx moyen saisonnier vaut 40 que lorsqu'il vaut 5 (**Fig. 2a**), mais aussi 10 fois plus de feux de 20 ha à IFMx et sensibilité de la végétation égaux dans le centre que dans le Sud-Est de la France.

Enfin, l'effet spatial (**Fig. 6.2d**) montre que les zones où la prévention et la lutte sont très importantes (Sud-Est, Sud-Ouest) présentent une activité de feu inférieure, à IFM, surface combustible et sensibilité brute égaux par rapport aux autres régions françaises. Cette dernière composante est très importante, pour ne pas sous-estimer ou surestimer les densités de feux au niveau interrégional. Afin de limiter d'éventuels mauvais ajustements locaux potentiels consécutifs aux hasards de la sous-détection, nous avons choisi d'ajuster un effet spatial lisse. Ainsi, pour que cet effet devienne régionalement faible ou fort, il faut soit une absence d'observation, soit que plusieurs observations sur un territoire assez large corroborent l'information. Cette approche « France entière » assez grossière diffère donc fortement des modèles *Firelihood* des zones Sud-Est et Sud-Ouest, qui sont en revanche beaucoup plus détaillés et précis, puisque la précision du jeu de données (taille, lieu, date) le permet. On notera cependant que le modèle spatial lisse présente des effets parfois assez marqués vers les bords du territoire national, où les observations (ou l'absence d'observation) locales prennent un poids plus important, induisant des valeurs d'effet spatial plus contrastées, avec des niveaux élevés dans les Pyrénées et assez faibles en Bretagne Sud et dans le Nord-Est. La **Fig. 6.3** montre le modèle « France entière » (celui de la **Fig. 6.2c**), sur lequel on a reporté sous forme de croix rouges les feux de notre base de données 2008-2020 qui a servi à calibrer le modèle (hors Sud-Est et Sud-Ouest). Le peu d'observations de feux dans le Nord-Est ou dans le Finistère et les nombreuses observations dans la zone pyrénéenne entre 2008 et 2020 expliquent pour partie les valeurs de l'effet spatial ajusté dans ces territoires (**Fig. 6.2d**). Il conviendra donc de porter une attention particulière aux territoires proches des limites hexagonales (hors zones Sud-Est et Sud-Ouest pour lesquelles on se référera aux chapitres précédents), afin de s'assurer que les densités de feux prédites sont consistantes et d'effectuer les ajustements nécessaires.

Sur cette même **Fig. 6.3**, les cercles violets correspondent aux observations faites entre 2021 et 2022 pour les feux estivaux de plus de 20 ha. Celles-ci sont exhaustives sur tout le territoire et peuvent donc permettre d'évaluer le modèle, qui semble assez robuste malgré le fait que ni le climat 2022 (non disponible), ni ces données de feux 2021-2022 n'ont été prises en compte dans l'ajustement du modèle et sa projection. On notera que les feux du Finistère semblent cependant sous-estimés avec le climat 2001-2020.

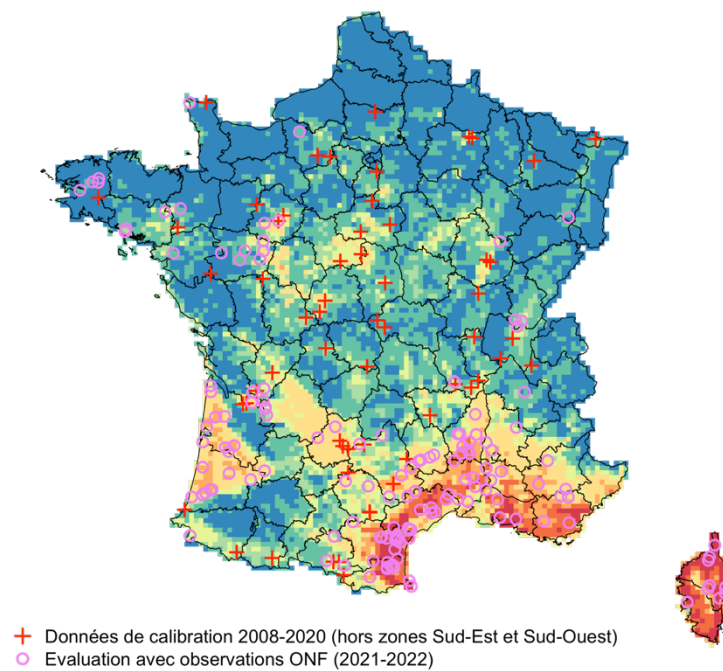


Figure 6.3. Même figure que **Fig. 6.1c**, sur laquelle on a reporté les feux hors zones Sud-Est et Sud-Ouest qui ont servi à ajuster le modèle (croix rouges). Les cercles en violet correspondent aux positions des feux estivaux pour les périodes 2021-2022, permettant une évaluation de la robustesse de l'approche.

6.2. Projections de l'évolution des feux > 20 ha

6.2.1. Tendances « France entière »

Les nombres de feux estimés dans les différents pixels peuvent être sommés pour estimer le nombre de feux > 20 ha attendus sur le territoire national. Ce nombre total atteint environ 900 feux simulés sur le territoire hexagonal pour la climatologie observée sur la période 2001-2020, soit environ 45 feux par an.

La **Figure 6.4** présente les projections de cette métrique pour le RCP 4.5 (bleu) et 8.5 (rouge), en moyenne sur 20 ans. Le second axe des ordonnées, à droite des graphiques, permet de traduire les augmentations en termes de pourcentages, par rapport à la référence correspondant au climat projeté par les modèles climatiques pour la période de référence 2001-2020. Cette projection est inférieure à l'activité simulée à partir des IFMx réellement observés sur la période 2001-2020 issus de SAFRAN en noir. Comme expliqué au chapitre 2, cette sous-estimation résulte du fait que l'IFM projeté à partir des modèles climatiques sur cette période en zones⁴² Sud-Est et Sud-Ouest est nettement plus faible que ce qui a été réellement observé à cette période.

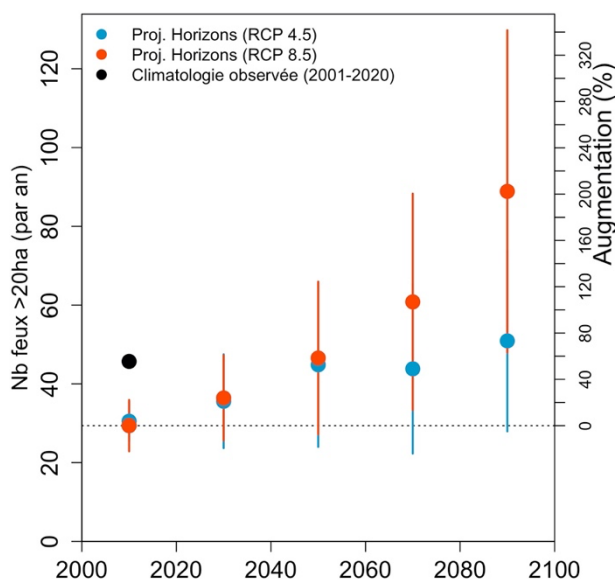


Figure 6.4. Projections des nombres de feux > 20 ha au 21^{ème} siècle selon deux scénarios (RCP 4.5 en bleu et 8.5 en rouge). Les différents horizons correspondent à des moyennes annuelles pour des périodes de 20 ans. Les barres verticales représentent l'écart type lié à l'incertitude entre modèles climatiques (+/- un écart type). Le point noir correspond à des simulations pour la période 2001-2020 réalisées à partir des IFMx observés (calculés à partir de SAFRAN par Météo-France), ce qui constitue une référence climatologique historique pour la période 2001-2020.

La **Figure 6.4** montre les tendances des N20ha selon les deux scénarios RCP 4.5 et 8.5, avec un triplement attendu en fin de siècle sous RCP 8.5 et des augmentations de l'ordre de +60 % en milieu de siècle pour les deux scénarios. Ces augmentations sont très largement dominées par les activités de feux de la zone Sud-Est, et s'avèrent cohérentes

⁴² A ne pas confondre avec les « zones de défense et de sécurité », définies pour l'organisation de la sécurité nationale et de la défense civile et économique. La zone « Sud-Est » considérée ici est parfois appelée zone Méditerranéenne.

avec les résultats du chapitre 3 pour la zone Sud-Est, qui projettent une augmentation des feux entre 10 et 100 ha comprise entre 165 et 211 % en 2090 sous RCP 8.5 (Table B.1), malgré les approches de modélisations différentes (modèle probabiliste et projections climatiques différentes). La différence principale concerne ici les incertitudes liées aux modèles climatiques qui sont plus importantes qu'au chapitre 3, ce qui s'explique essentiellement par la méthodologie de descente d'échelle utilisée dans DRIAS 2020, qui conduit à une variabilité (ou « spread ») plus importante entre modèles climatiques que la méthode INRAE (voir section 2.3).

6.2.2. Projections spatialisées sur les pixels SAFRAN

Les **figures 6.5 et 6.6** montrent l'évolution de l'activité des feux > 20 ha agrégée sur 20 ans par pixel, selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5. Une comparaison visuelle confirme que l'essentiel des activités concerne les zones Sud-Est et Sud-Ouest et que les niveaux d'activités les plus importants auront lieu dans ces zones dans le futur, quel que soit le scénario. On vérifie également que la sous-estimation des projections par rapport aux observations historiques (comparaison entre **Fig. 6.5a** et **6.5b**) par exemple, concerne surtout les zones Sud-Est et Sud-Ouest, mais pas le reste du territoire national pour lesquels les projections d'IFM sont souvent plus consistantes avec les observations (cf **Fig. 2.1**) - avec quelques sous-estimations en Côte d'Or et dans l'Yonne et des surestimations au Nord-ouest (peu visible sur la **Fig. 6.5**, mais marquée à l'échelle des départements voir **Fig. 6.7 a & b** par exemple).

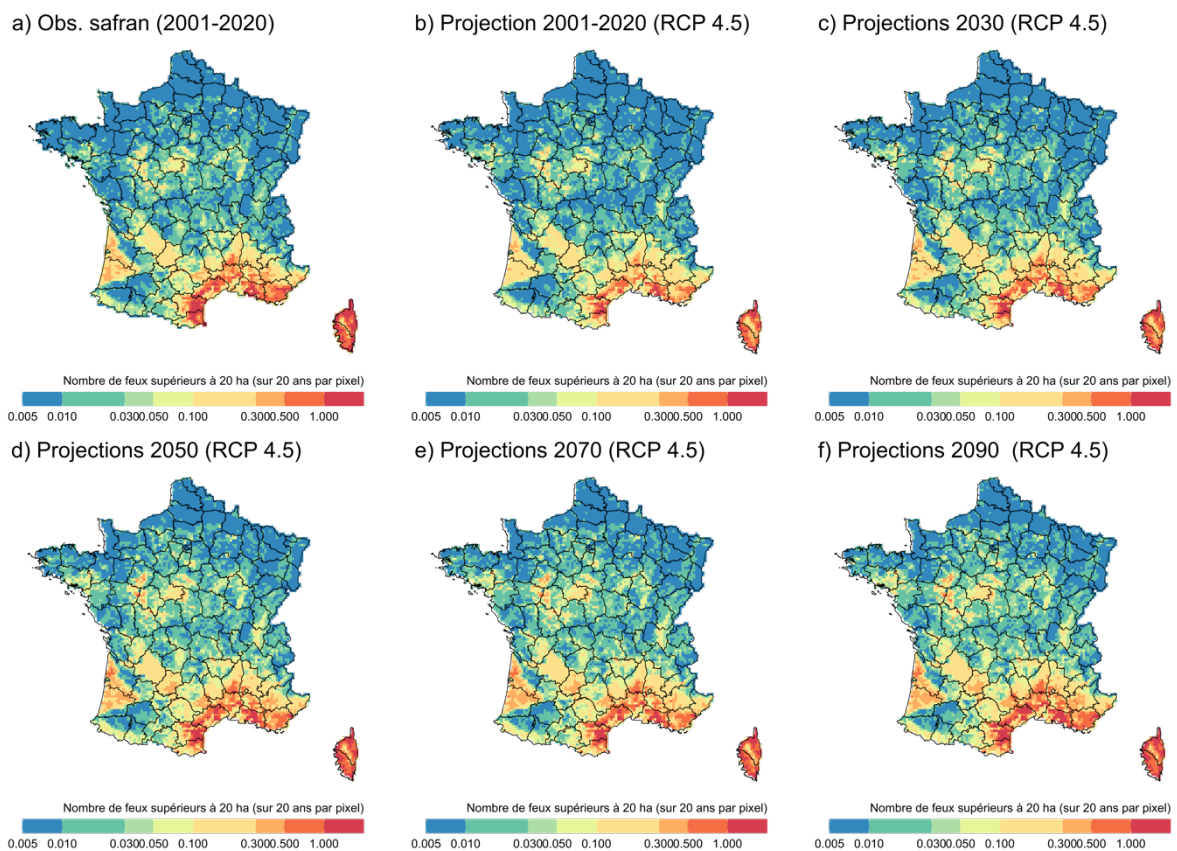


Figure 6.5. Nombres de feux > 20 ha par pixel de 8 km de côté sur 20 ans **(a)** pour la période historique 2001-2020 (observation SAFRAN) ; **(b-f)** pour les projections du RCP 4.5 à différents horizons.

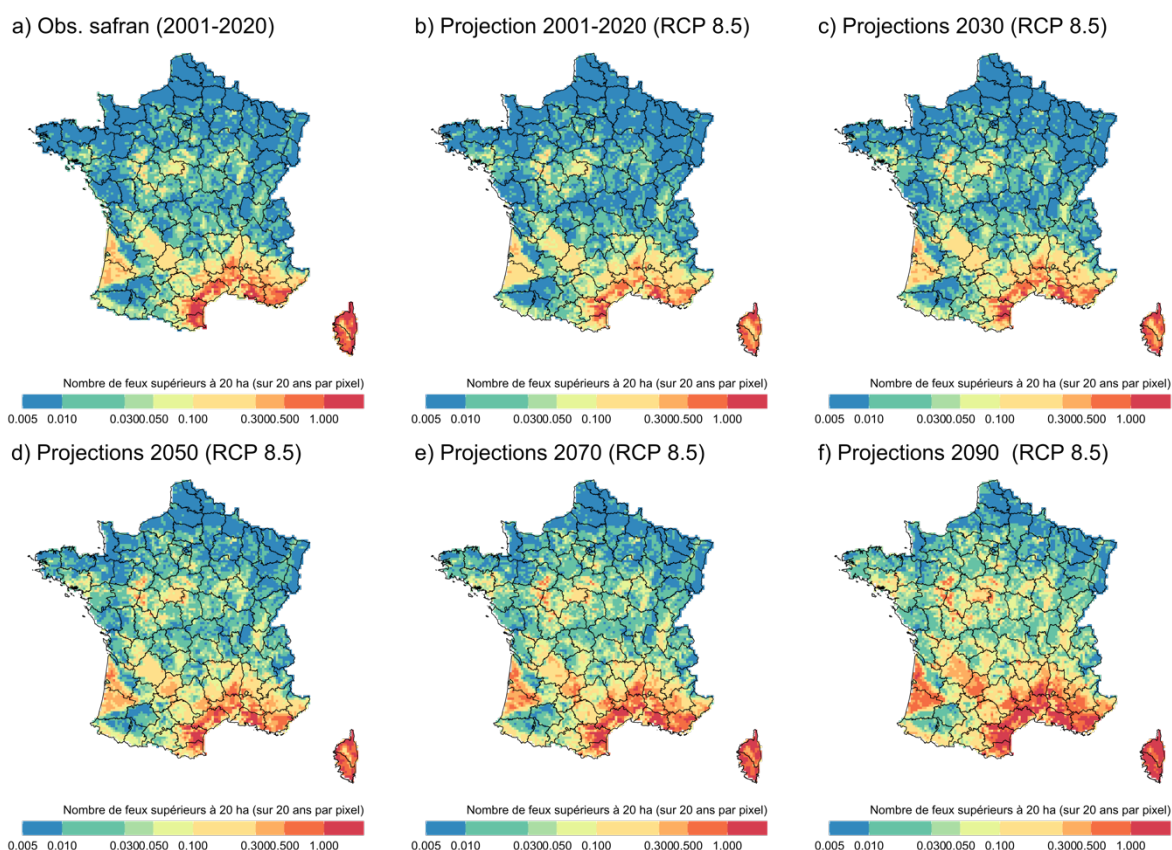


Figure 6.6. Nombres de feux > 20 ha par pixel de 8 km de côté sur 20 ans **(a)** pour la période historique 2001-2020 (observation SAFRAN) ; **(b-f)** pour les projections du RCP 8.5 à différents horizons.

6.2.3. Projections spatialisées à l'échelle des départements

Même s'il est plus précis qu'un modèle sans effet spatial, le modèle « France entière » est moins précis spatialement que les modèles Firelihood Sud-Est et Sud-Ouest, en raison notamment de l'effet spatial lisse⁴³ (cf **Fig 6.2d**). Nous avons donc agrégé les nombres de feux N20 à l'échelle départementale, pour laquelle nous estimons que les projections sont plus robustes, mais aussi plus synthétiques et informatives.

⁴³ Dans le cas des modèles en zones Sud-Est/Sud-Ouest, on a des effets spatiaux sophistiqués (INLA-SPDE) qui nous servent à simuler l'occurrence des feux > 1h de manière relativement précise spatialement, car il y a beaucoup de données pour ajuster les variations spatiales « inexplicées » (+ de feux en Corse, etc). A l'échelle du territoire national, on a des données éparses et trop peu fiables pour ajuster des corrections locales du même type. On a un effet spatial simple (GAM) avec une portée spatiale très longue (ajustée par le modèle de la **Fig. 6.2d**) qui permet de simuler un nombre de feux cohérent avec les observations en centre ouest par exemple.

Les **Figures 6.7 et 6.8**, ainsi que les **Tables 6.1 et D2 (annexe D)** présentent ces résultats agrégés par départements. Sans surprise, on retrouve parmi les 20 départements les plus concernés, ceux des zones « Sud-Est » (hors 05) et « Sud-Ouest » (24, 33 et 40), mais aussi le 12, le 46, suivi par le 81, qui constituent des zones présentant des activités feux de forêt significatives aux marges des zones Sud-Est et Sud-Ouest. Le 05 et le 47 figurent en 23^{ème} et 24^{ème} position. Dans la moitié Nord de la France, on trouve une zone d'activité significative que nous appellerons ici zone « Centre-Ouest » autour des départements 37, 41 et 72, avec également le 21 qui figure parmi les plus concernés (26^{ème}).

Les projections modifient globalement assez peu cette hiérarchie, l'ensemble du territoire étant touché par une forte intensification, en particulier sous RCP 8.5 en fin de siècle. Cette intensification générale se traduit par une expansion autour de la zone Sud-Est (12, 81, 43, 09, 31, 38 et même 63 et 01) et de la zone Sud-Ouest (46, 64, 16, 31, 82, 19, 17 et 65), conduisant à une moitié sud quasiment concernée dans son intégralité par des feux de forêt significatifs en fin de siècle sous RCP 8.5. La zone « Centre-Ouest » s'étend également, avec la montée en puissance progressive d'activité des feux dans les départements 49, 18, 86, 45, 36 et 89, joignant ainsi progressivement les deux zones historiquement exposées de la moitié Sud. On notera enfin que la Bretagne est concernée avec le 56, mais pas le 29 (alors qu'un nombre important de feux > 20 ha a eu lieu en 2022, mais aussi en 1976 et 1996). Ce dernier élément confirme qu'il sera utile d'actualiser l'étude en incluant les feux de 2022 dès que possible.

Les **tables 6.1** pour les 45^{ème} premiers départements (et **Annexe D2** pour les 45 suivants) confirment les résultats des études Sud-Est et Sud-Ouest, à savoir que les intensifications les plus fortes en valeurs absolues (i.e. en nombre de feux) sont attendues dans le Sud-Est et le Sud-Ouest. On notera cependant que les départements dans lesquels l'intensification sera la plus importante en valeur relative par rapport aux références historiques concernent plutôt les zones d'expansion que les cœurs historiques des trois zones. En effet, les départements pour lesquels on attend un facteur d'augmentation supérieur à 3.5 entre la référence 2010 et la fin de siècle sous RCP8.5 sont les suivants : dans la zone Sud-Est et son expansion, il s'agit des départements 12, 48, 81, 43, 09, 31 et 01 ; dans la zone Sud-Ouest, il s'agit du 46, du 64, du 31, du 19 et du 65 ; dans la zone « centre-ouest », il s'agit du 18 et du 21, suggérant ainsi la présence de changements rapides en périphérie des zones historiques.

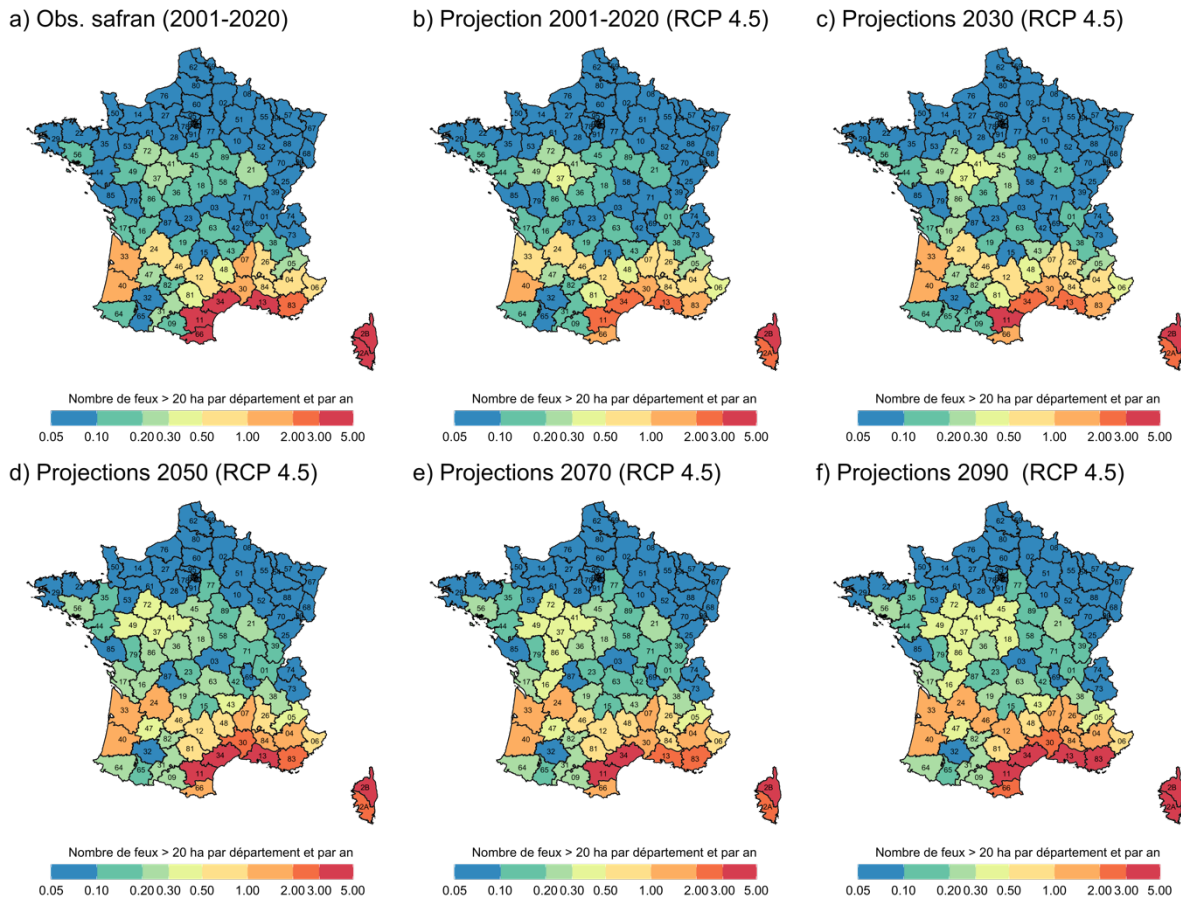


Figure 6.7. Nombres de feux > 20 ha par département et par an **(a)** pour la période historique 2001-2020 (observation SAFRAN) ; **(b-f)** pour les projections du RCP 4.5 à différents horizons. On notera qu'il s'agit bien de nombres de feux par département et non de densités de feux au sein des départements. Ainsi, les départements les plus importants en superficie présentent, à densité de feux égale, une activité de feu supérieure à ceux qui sont plus petits.

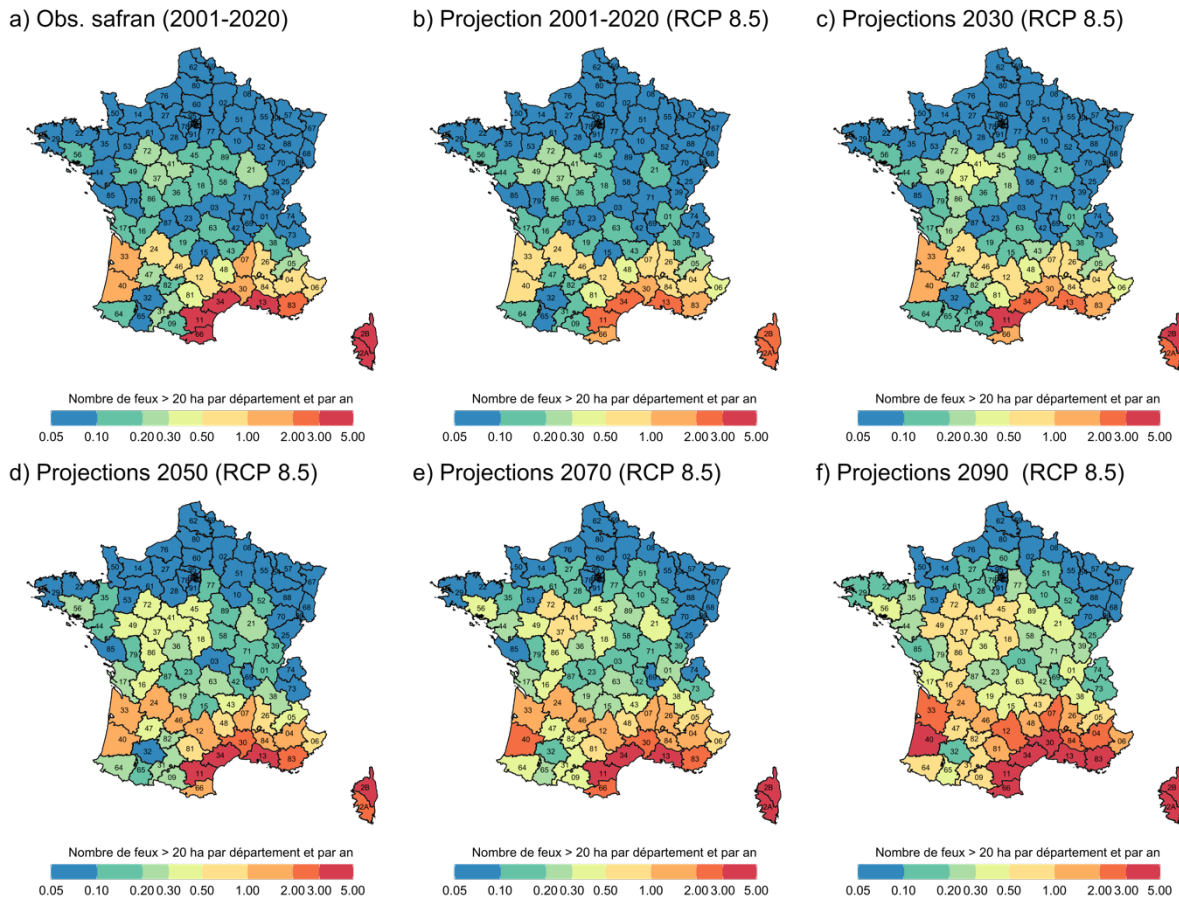


Figure 6.8. Nombres de feux > 20 ha par département et par an **(a)** pour la période historique 2001-2020 (observation SAFRAN) ; **(b-f)** pour les projections du RCP 8.5 à différents horizons. On notera qu'il s'agit bien de nombres de feux par département et non de densités de feux au sein des départements. Ainsi, les départements les plus importants en superficie présentent à densité de feu égale, une activité de feu supérieure à ceux qui sont plus petits.

Table D1. Nombres de feux > 20 ha par département et par an pour la période historique 2001-2020 (climatologie observée SAFRAN) et pour les projections du RCP 4.5 et 8.5 à différents horizons, pour les 45 départements présentant la plus forte activité N20 en climatologie observée.

DEP	Climatologie réelle 2001-2020	2010 (RCP8.5)	2030 (RCP8.5)	2050 (RCP8.5)	2070 (RCP8.5)	2090 (RCP8.5)	2010 (RCP4.5)	2030 (RCP4.5)	2050 (RCP4.5)	2070 (RCP4.5)	2090 (RCP4.5)
1 2B	6.600	2.900	3.600	4.00	5.10	7.30	3.200	3.500	4.10	3.80	4.60
2 11	5.000	2.400	3.000	3.80	5.20	7.90	2.500	3.000	3.80	3.60	4.40
3 2A	3.600	2.100	2.600	2.90	3.50	4.90	2.200	2.500	3.00	2.80	3.20
4 34	3.100	2.200	2.700	3.40	4.50	6.80	2.300	2.700	3.30	3.20	4.00
5 13	3.100	2.100	2.700	3.10	4.00	5.80	2.200	2.500	3.10	2.90	3.50
6 66	3.000	1.100	1.400	1.80	2.40	3.60	1.200	1.500	1.80	1.70	2.20
7 83	2.900	1.700	2.000	2.30	3.00	4.30	1.700	1.900	2.30	2.20	2.80
8 30	1.900	1.400	1.700	2.10	2.80	4.20	1.400	1.700	2.10	2.00	2.50
9 40	1.400	0.960	1.300	1.60	2.10	3.00	1.000	1.200	1.50	1.60	1.60
10 33	1.100	0.870	1.100	1.40	1.80	2.50	0.910	1.000	1.30	1.40	1.40
11 07	1.100	0.790	0.960	1.30	1.70	2.60	0.780	0.950	1.20	1.20	1.40
12 04	0.980	0.690	0.880	1.10	1.50	2.30	0.690	0.830	1.10	1.00	1.20
13 84	0.920	0.700	0.870	1.00	1.40	2.00	0.720	0.830	1.00	0.96	1.20
14 12	0.830	0.570	0.720	1.00	1.40	2.20	0.580	0.720	0.97	0.95	1.10
15 26	0.690	0.610	0.750	0.97	1.30	1.90	0.620	0.740	0.94	0.89	1.10
16 46	0.640	0.550	0.720	1.00	1.40	2.00	0.580	0.710	0.92	0.95	1.00
17 24	0.640	0.590	0.770	1.10	1.40	2.00	0.650	0.740	1.00	1.00	1.10
18 06	0.510	0.400	0.480	0.57	0.75	1.10	0.400	0.470	0.57	0.56	0.64
19 48	0.420	0.340	0.440	0.62	0.88	1.40	0.340	0.430	0.59	0.57	0.70
20 81	0.380	0.330	0.420	0.58	0.79	1.20	0.330	0.420	0.54	0.54	0.59
21 37	0.290	0.290	0.360	0.50	0.63	0.85	0.310	0.330	0.46	0.48	0.50
22 41	0.270	0.260	0.320	0.47	0.57	0.80	0.280	0.310	0.42	0.44	0.46
23 05	0.270	0.230	0.290	0.36	0.52	0.75	0.220	0.280	0.36	0.35	0.39
24 47	0.230	0.190	0.260	0.35	0.46	0.65	0.210	0.240	0.31	0.32	0.34
25 72	0.220	0.240	0.280	0.40	0.50	0.68	0.250	0.270	0.37	0.39	0.41
26 21	0.220	0.130	0.160	0.25	0.32	0.47	0.140	0.170	0.23	0.22	0.24
27 31	0.210	0.140	0.190	0.26	0.36	0.55	0.140	0.190	0.23	0.24	0.26
28 43	0.200	0.180	0.220	0.32	0.45	0.70	0.180	0.220	0.31	0.29	0.33
29 82	0.200	0.160	0.210	0.28	0.37	0.52	0.160	0.200	0.26	0.26	0.28
30 09	0.200	0.140	0.180	0.25	0.37	0.57	0.140	0.180	0.23	0.24	0.29
31 64	0.190	0.150	0.190	0.26	0.36	0.58	0.160	0.190	0.24	0.26	0.26
32 18	0.190	0.170	0.200	0.31	0.40	0.58	0.180	0.210	0.28	0.29	0.31
33 17	0.190	0.130	0.160	0.22	0.28	0.38	0.140	0.160	0.20	0.22	0.22
34 16	0.190	0.180	0.230	0.32	0.41	0.57	0.200	0.220	0.29	0.31	0.31
35 86	0.190	0.180	0.230	0.32	0.42	0.57	0.190	0.210	0.29	0.31	0.31
36 49	0.180	0.210	0.250	0.35	0.44	0.59	0.220	0.240	0.32	0.34	0.35
37 45	0.180	0.180	0.210	0.32	0.38	0.54	0.190	0.210	0.29	0.29	0.31
38 36	0.150	0.120	0.150	0.22	0.28	0.40	0.130	0.140	0.20	0.21	0.21
39 89	0.140	0.098	0.120	0.19	0.23	0.33	0.100	0.120	0.17	0.17	0.18
40 63	0.140	0.120	0.140	0.22	0.30	0.45	0.120	0.150	0.20	0.20	0.22
41 19	0.120	0.120	0.150	0.22	0.30	0.45	0.120	0.140	0.20	0.21	0.22
42 56	0.120	0.140	0.170	0.25	0.32	0.46	0.150	0.170	0.22	0.24	0.27
43 38	0.110	0.130	0.160	0.23	0.31	0.47	0.130	0.160	0.22	0.21	0.23
44 58	0.100	0.074	0.089	0.14	0.18	0.27	0.076	0.093	0.13	0.13	0.14
45 79	0.096	0.080	0.100	0.14	0.19	0.25	0.086	0.097	0.13	0.14	0.14

6.3. Synthèse des analyses « France entière »

La méthodologie a permis de projeter sur l'ensemble du territoire une métrique de l'activité des feux (nombres de feux « significatifs » > 20 ha) sous changement climatique, en combinant objectivement IFM et sensibilité brute de la végétation. Ces projections ont pu être agrégées à l'échelle des départements, ce qui permet d'établir une hiérarchie entre leur exposition respective et de voir les évolutions.

Cette approche complète l'étude de l'ONF sur l'évolution de la sensibilité des massifs aux feux de forêt avec les changements climatiques, puisqu'elle fournit une évaluation quantitative permettant de comparer les départements entre eux. Elle complète également les études portant sur les zones Sud-Est et Sud-Ouest, en étendant une petite partie des analyses à l'ensemble du territoire national. En ce qui concerne les limites de l'approche, on retrouve celles décrites en détail dans la section 5.1, notamment en ce qui concerne la non prise en compte des évolutions futures de la végétation⁴⁴, de la prévention et de la lutte. A celles-ci s'ajoute spécifiquement pour l'étude « France entière » une incertitude supplémentaire en périphérie du territoire national, à cause des incertitudes sur l'estimation de l'effet spatial lisse (voir 6.1). On pense notamment à la Bretagne ou aux Vosges dans lesquelles les activités de feux pourraient avoir été sous-estimées, faute d'observation de feux > 20 ha dans ces zones sur l'ensemble de la période 2008-2020.

Cette étude complémentaire permet de montrer une augmentation générale attendue de l'exposition aux feux de forêt dont l'amplitude varie selon les scénarios et horizons. Cependant, la hiérarchie entre départements devrait être assez peu modifiée par le changement climatique. Trois zones⁴⁵ historiquement favorables aux feux sont identifiées dans la présente étude, appelées « Sud-Est », « Sud-Ouest » et « Centre-Ouest », dans lesquelles l'activité des feux > 20 ha s'intensifie le plus fortement, comme déjà constaté dans le Sud-Est et le Sud-Ouest. Une expansion se produit au voisinage de ces zones (vers le sud, l'est et l'ouest pour la zone Centre-Ouest, et vers le centre du pays et les Pyrénées pour les zones Sud-Est et Sud-Ouest), pouvant aboutir à la réunion de ces trois zones en fin de siècle sous RCP 8.5. Les augmentations relatives du nombre de feux > 20 ha peuvent être particulièrement marquées dans certains départements aux marges des zones historiques, qui devraient ainsi connaître les changements les plus rapides.

Comme pour les travaux précédents, on peut cependant noter qu'une actualisation sera utile l'année prochaine, lorsque les données météorologiques seront disponibles pour l'ensemble de la saison 2022. En effet, même si la **Figure 6.3** montre que la distribution des feux 2022 est plutôt conforme aux prédictions du modèle (à l'exception du Finistère), le nombre très important d'incendies > 20 ha s'étant produits hors zones Sud-Est et Sud-Ouest, pour lesquels l'ONF dispose de contours exhaustifs, permettra d'affiner les modèles

⁴⁴ En termes de structure, car les aspects hydriques sont pris en compte par les sous-indices « sécheresse » de l'IFM.

⁴⁵ A ne pas confondre avec les « zones de défense et de sécurité », définies pour l'organisation de la sécurité nationale et de la défense civile et économique. La zone « Sud-Est » considérée ici est parfois appelée zone Méditerranéenne.

Remerciements :

Nous remercions le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire pour le soutien financier qu'il a apporté à cette étude (convention n° G 03/2022), ainsi que le CGAER qui a décidé le financement de la thèse FCPR d'Hélène Fargeon (2016-2019) à l'origine des premiers développements méthodologiques du modèle *Firelihood*.

Nous remercions Remi Savazzi et Benoît Reymond de l'Agence DFCI de l'ONF pour leurs contributions à l'élaboration du modèle « France entière », ainsi que le Ministère de la Transition Ecologique et de Cohésion des Territoires pour leur soutien. Ce modèle a été utilisé pour réaliser les projections au chapitre 6.

Nous remercions Florent Mouillot, de l'IRD, pour les données globales FRYV2 qui ont été utilisées pour compléter les contours de feux hors zones Sud-Est et Sud-Ouest et pour les éléments qu'il nous a transmis en ce qui concerne les produits globaux.

Nous remercions l'Agence DFCI de l'ONF (Marion Toutchkoff, Remi Savazzi, Benoît Reymond), le SDIS13 (Lieutenant-colonel Xavier Joseph), l'ARDFCI (Cédric Barlet et Marion Laquerre), ainsi que le Bureau d'Analyse et de Gestion des Risques du Ministère de l'Intérieur (Lieutenant-colonel Fabrice Chassagne) pour les échanges et retours précieux sur des versions préliminaires du présent rapport.

Nous remercions le GIP ATGeRi, qui nous a fourni les données de feux en zone Sud-Ouest incluant les localisations des feux, ainsi que des explications sur la qualité des données.

Nous remercions Météo-France (Mathieu Regimbeau) pour la fourniture des données SAFRAN, d'IFM12 et IFMx en période historique et des données brutes de projection d'IFM12 et IFMx pour la campagne DRIAS 2020, qui ont permis de réaliser les comparaisons présentées au chapitre 2 et les projections présentées au chapitre 6.

probabilistes sur le reste du territoire métropolitain, en augmentant de 40 % l'effectif de feux disponibles.

Références

- Abadie J, Dupouey J-L, Avon C, Rochel X, Tatoni T, Bergès L (2018) Forest recovery since 1860 in a Mediterranean region: drivers and implications for land use and land cover spatial distribution. *Landscape Ecology* **33**, 289–305.
- Abatzoglou JT, Kolden CA (2011) Relative importance of weather and climate on wildfire growth in interior Alaska. *International Journal of Wildland Fire* **20**, 479–486.
- Abatzoglou JT, Juang CS, Williams AP, Kolden CA, Westerling AL (2021) Increasing Synchronous Fire Danger in Forests of the Western United States. *Geophysical Research Letters* **48**,. doi:[10.1029/2020GL091377](https://doi.org/10.1029/2020GL091377).
- Amatulli G, Camia A, San-Miguel-Ayanz J (2013) Estimating future burned areas under changing climate in the EU-Mediterranean countries. *Science of The Total Environment* **450-451**, 209–222. doi:[10.1016/j.scitotenv.2013.02.014](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.014).
- Barbero R, Abatzoglou JT, Larkin NK, Kolden CA, Stocks B (2015) Climate change presents increased potential for very large fires in the contiguous United States. *International Journal of Wildland Fire* **24**, 892. doi:[10.1071/WF15083](https://doi.org/10.1071/WF15083).
- Barbero R, Abatzoglou JT, Pimont F, Ruffault J, Curt T (2020) Attributing Increases in Fire Weather to Anthropogenic Climate Change Over France. *Frontiers in Earth Science* **8**, 104. doi:[10.3389/feart.2020.00104](https://doi.org/10.3389/feart.2020.00104).
- Balch, J.K., Abatzoglou, J.T., Joseph, M.B. et al. (2022) Warming weakens the night-time barrier to global fire. *Nature* **602**, 442–448. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04325-1>
- Bedia J, Herrera S, Camia A, Moreno JM, Gutiérrez JM (2014) Forest fire danger projections in the Mediterranean using ENSEMBLES regional climate change scenarios. *Climatic Change* **122**, 185–199. doi:[10.1007/s10584-013-1005-z](https://doi.org/10.1007/s10584-013-1005-z).
- Cannon AJ (2018) Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics* **50**, 31–49. doi:[10.1007/s00382-017-3580-6](https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6).
- Castel-Clavera J, Pimont F, Opitz T, Ruffault J, Rivière M, Dupuy J-L (2022) Disentangling the factors of spatio-temporal patterns of wildfire activity in south-eastern France. *International Journal of Wildland Fire* **32**, 15–28. doi:[10.1071/WF22086](https://doi.org/10.1071/WF22086).
- Chatry C, Le Gallou J, Le Quentrec M, Lafitte J, Laurens D, Creuchet D, Grelu, J (2010) Rapport de la mission interministérielle 'Changements climatiques et extension des zones sensibles aux feux de forêt'. Rapport Min. Alimentation Agriculture Pêche n° 1796. (Paris)
- Dong C (2022) The season for large fires in Southern California is projected to lengthen in a changing climate. 9. *Communication Earth and Environment* **3**, 22. doi:[10.1038/s43247-022-00344-6](https://doi.org/10.1038/s43247-022-00344-6).
- Dupire S, Curt T, Bigot S, Fréjaville T (2019) Vulnerability of forest ecosystems to fire in the French Alps. *European Journal of Forest Research* **138**, 813–830. doi:[10.1007/s10342-019-01206-1](https://doi.org/10.1007/s10342-019-01206-1).
- Dupuy J, Fargeon H, Martin-StPaul N, Pimont F, Ruffault J, Guijarro M, Hernando C, Madrigal J, Fernandes P (2020) Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review. *Annals of Forest Science* **77**, 35. doi:[10.1007/s13595-020-00933-5](https://doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5).
- Evin G, Curt T, Eckert N (2018) Has fire policy decreased the return period of the largest wildfire events in France? A Bayesian assessment based on extreme value theory. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **18**, 2641–2651. doi:[10.5194/nhess-18-2641-2018](https://doi.org/10.5194/nhess-18-2641-2018).
- Fargeon, H., 2019. Effet du changement climatique sur l'évolution de l'aléa incendie de forêt en France métropolitaine au 21ème siècle. Thèse de doctorat, AgroParisTech, Agreenium, 261p.

- Fargeon H, Pimont F, Martin-StPaul N, De Caceres M, Ruffault J, Barbero R, Dupuy J-L (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](https://doi.org/10.1007/s10584-019-02629-w).
- Fusco EJ, Finn JT, Abatzoglou JT, Balch JK, Dadashi S, Bradley BA (2019) Detection rates and biases of fire observations from MODIS and agency reports in the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment* **220**, 30–40. doi:10.1016/j.rse.2018.10.028.
- Koh J, Pimont F, Dupuy J-L, Opitz T (2023) Spatiotemporal wildfire modeling through point processes with moderate and extreme marks. *The Annals of Applied Statistics* **17**,. doi:[10.1214/22-AOAS1642](https://doi.org/10.1214/22-AOAS1642).
- Kotlarski S, Keuler K, Christensen OB, Colette A, et al. (2014) Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development* **7**, 1297–1333. doi:[10.5194/gmd-7-1297-2014](https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014).
- Lindgren F, Rue H (2015) Bayesian Spatial Modelling with R - INLA. *Journal of Statistical Software* **63**,. doi:10.18637/jss.v063.i19
- MTECT (2023a). Dossier de presse du 23 mai 2023 : “La trajectoire de réchauffement de référence pour l’adaptation au changement climatique (TRACC)», 8p. <https://www.ecologie.gouv.fr/trajectoire-rechauffement-reference-ladaptation-au-changement-climatique-tracc>
- MTECT (2023b). Document technique du 23 mai 2023 “La trajectoire de réchauffement de référence pour l’adaptation au changement climatique (TRACC)», 31p. <https://www.ecologie.gouv.fr/trajectoire-rechauffement-reference-ladaptation-au-changement-climatique-tracc>
- Pimont F, Fargeon H, Opitz T, Ruffault J, Barbero R, Martin-Stpaul N, Rigolot E, Riviere M, Dupuy J-L (2021) Prediction of regional wildfire activity in the probabilistic Bayesian framework of Firelihood. *Ecological Applications* **31**, 24.
- Pimont F, Ruffault J, Opitz T, Fargeon H, Barbero R, Castel-Clavera J, Martin-StPaul N, Rigolot E, Dupuy J-L (2022) Future expansion, seasonal lengthening and intensification of fire activity under climate change in southeastern France. *International Journal of Wildland Fire* **32**, 4–14. doi:[10.1071/WF22103](https://doi.org/10.1071/WF22103).
- Pimont F, Ruffault J, Opitz T, Barbero R, Dupuy J-L (2023) Projections of average and extreme regional wildfire activities: trends and uncertainties. In prep.
- Ribes A, Boé J, Qasmi S, Dubuisson B, Douville H, Terray L (2022) An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth Syst. Dynam.* **13**, 1397–1415.
- Rivière M, Pimont F, Delacote P, Caurla S, Ruffault J, Lobianco A, Opitz T, Dupuy JL (2022) A Bioeconomic Projection of Climate-Induced Wildfire Risk in the Forest Sector. *Earth’s Future* **10**, e2021EF002433. doi:10.1029/2021EF002433.
- Rodrigues M, Camprubí ÀC, Balaguer-Romano R, Megía CJC, Castañares F, Ruffault J, ... & de Dios VR (2023) Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe. *Science of the total environment*, **859**, 160320.
- Ruffault J, Curt T, Moron V, Trigo RM, Mouillot F, Koutsias N, Pimont F, Martin-StPaul N, Barbero R, Dupuy J-L, Russo A, Belhadj-Khedher C (2020) Increased likelihood of heat-induced large wildfires in the Mediterranean Basin. *Scientific Reports* **10**, 13790. doi:10.1038/s41598-020-70069-z.
- Stavros E. Natasha, Abatzoglou John, Larkin Narasimhan K., McKenzie Donald, Steel E. Ashley (2014) Climate and very large wildland fires in the contiguous western USA. *International Journal of Wildland Fire* **23**, 899-914.
- Van Wagner CE (1987) ‘Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System.’ (Canada Communication Group Publ: Ottawa)

- Verfaillie D, Déqué M, Morin S, Lafaysse, M (2017) The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, **10**, 4257–4283.
- Vidal J-P, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M, Soubeyroux J-M (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system. *International Journal of Climatology* **30**, 1627–1644. doi:[10.1002/joc.2003](https://doi.org/10.1002/joc.2003).

Annexe A. Détails méthodologiques

Les projections de l'activité des feux s'appuient sur des projections d'IFM dit « jour », calculé à partir des données SAFRAN journalières de température moyenne, vent moyen, humidité relative minimale et précipitations journalières, selon la méthode de Bédia et al. (2014), utilisée dans Fargeon et al. (2020), puis Pimont et al. (2021) pour ajuster le modèle *Firelihood*. Des comparaisons récentes ont montré que les performances de cet IFM « jour » étaient équivalentes à celles de l'IFM à « midi » ou de l'IFM « maximum » et meilleur que la plupart des autres indices existant sur le plan international pour prédire les activités de feux quotidiennes à l'échelle des pixels SAFRAN dans un cadre probabiliste (Travaux de thèse en cours de Jorge Castel-Clavera). Les projections des différentes variables météorologiques nécessaires au calcul de l'IFM ont été calculées avec 16 couples GCM-RCM d'EURO-CORDEX (**Table A.1**, Kotlarski et al. 2014) et ont été descendues à l'échelle des points de grille de 8 km grâce à la réanalyse SAFRAN (Vidal et al. 2010) et des corrections de biais quantile/quantile mensuelles (Cannon et al. 2018).

Table A.1. Sélection des modèles climatiques EURO-CORDEX (i.e. couples GCM-RCM) utilisés pour calculer les projections d'IFM « jour » de la présente étude (RCP 4.5 et 8.5). Afin d'obtenir une sélection de modèles climatique la plus proche de celle de DRIAS 2020 utilisé pour l'étude nationale, seuls les 10 modèles non barrés ont été utilisés. Les couples GCM/RCM sont identiques ou très similaires à ceux utilisés par Météo-France pour DRIAS 2020 (voir **table A.2**).

Forcing GCM	Run	RCM	Institution
CNRM-CM5	r1i1p1	RCA 4	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	RCA 4	CSIRO Marine and Atmospheric Research / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
HadGEM2-ES-01	r1i1p1	RACMO 2.2	Met Office / Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)
HadGEM2-ES-01	r1i1p1	RCA 4	Met Office / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
EC-EARTH	r3i1p1	HIRHAM-5	Irish Centre For High-End Computing (ICHEC) / Danish Meteorological Institute (DMI)
EC-EARTH	r1i1p1	RACMO 2.2	Irish Centre For High-End Computing (ICHEC) / Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)
EC-EARTH	r12i1p1	RCA 4	Irish Centre For High-End Computing (ICHEC) / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	RCA 4	Irish Centre For High-End Computing (ICHEC) / Swedish Meteorological and Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) / Hydrological Institute (SMHI)
IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	WRF331F	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) / IPSL INERIS
MIROC5	r1i1p1	RCA 4	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
MPI-ESM-LR	r1i1p1	RCA 4	Max-Planck-Institut für Meteorologie / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
MPI-ESM-LR	r1i1p1	REMO2009	Max-Planck-Institut für Meteorologie / Climate Service Center (CSC)
MPI-ESM-LR	r2i1p1	REMO2009	Max-Planck-Institut für Meteorologie / Climate Service Center (CSC)
CanESM2	r1i1p1	RCA4	Canadian Centre for Climate Modelling / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
NorESM1-M	r1i1p1	RCA4	Norwegian Meteorological Institute / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
GFDL-ESM2M	r1i1p1	RCA4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)

Table A.2. Sélection des modèles climatiques EURO-CORDEX (i.e. couples GCM-RCM) utilisés pour calculer les projections d'IFMx et IFM12 dans DRIAS 2020 utilisé pour l'étude nationale et la comparaison de la section 2.3 en zone Sud-Ouest.

Expérience	Institution	Modèle climatique Global *	Modèle climatique Régional **	Scénario CO2				Périodes disponibles	Nbr de variables
				Hist	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6		
DRIAS – 2020	CNRM	CNRM-CM5-LR	ALADIN63	x	x	x	x	1951-2005 ; 2006-2100	9
DRIAS – 2020	CLMcom	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	x	x	x	x	1950-2005 ; 2006-2100	7
DRIAS – 2020	ICTP	HadGEM2-ES	RegCM4-6	x	x		x	1970-2005 ; 2006-2099	7
DRIAS – 2020	SMHI	EC-EARTH	RCA4	x	x	x	x	1970-2005 ; 2006-2100	7
DRIAS – 2020	IPSL	IPSL-CM5A-MR	WRF381P	x	x	x		1951-2005 ; 2006-2100	7
DRIAS – 2020	GERICS	NorESM1-M	REMO2015	x	x		x	1950-2005 ; 2006-2100	7
DRIAS – 2020	CSC	MPI-ESM-LR	REMO2009	x	x	x	x	1970-2005 ; 2006-2100	7
DRIAS – 2020	CLMcom	HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	x	x	x		1950-2005 ; 2006-2099	7
DRIAS – 2020	KNMI	EC-EARTH	RACMO22E	x	x	x	x	1950-2005 ; 2006-2100	9
DRIAS – 2020	SMHI	IPSL-CM5A-MR	RCA4	x	x	x		1970-2005 ; 2006-2100	7
DRIAS – 2020	KNMI	CNRM-CM5-LR	RACMO22E	x	x	x	x	1950-2005 ; 2006-2100	9
DRIAS – 2020	DMI	NorESM1-M	HIRHAM5 v3	x	x	x		1951-2005 ; 2006-2100	7

12 12 10 8

Table A.3. Liste des 13 modèles climatiques EURO-CORDEX (i.e. couples GCM-RCM) utilisés pour calculer les projections d'IFM de Pimont et al. 2022 et du pré-rapport d'août 2022 (RCP 4.5 et 8.5). Trois modèles présentés **Table A.1** fournissant les variables requises n'avaient pas été retenus (CNRM-CM5/RCA4, EC-EARTH/HIRHAM5 et IPSL-CM5A-MR/WRF331F), compte-tenu des réserves les concernant mentionnées sur le site DRIAS.

(http://www.drias-climat.fr/document/Doc-Limitation-Simulations-EUROCORDEX-2014_v20201130.pdf)

Forcing GCM	Run	RCM	Institution
CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	RCA 4	CSIRO Marine and Atmospheric Research / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
HadGEM2-ES-01	r1i1p1	RACMO 2.2	Met Office / Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)
HadGEM2-ES-01	r1i1p1	RCA 4	Met Office / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
EC-EARTH	r1i1p1	RACMO 2.2	Irish Centre For High-End Computing (ICHEC) / Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)
EC-EARTH	r12i1p1	RCA 4	Irish Centre For High-End Computing (ICHEC) / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	RCA 4	Irish Centre For High-End Computing (ICHEC) / Swedish Meteorological and Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) / Hydrological Institute (SMHI)
MIROC5	r1i1p1	RCA 4	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
MPI-ESM-LR	r1i1p1	RCA 4	Max-Planck-Institut für Meteorologie / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
MPI-ESM-LR	r1i1p1	REMO2009	Max-Planck-Institut für Meteorologie / Climate Service Center (CSC)
MPI-ESM-LR	r2i1p1	REMO2009	Max-Planck-Institut für Meteorologie / Climate Service Center (CSC)
CanESM2	r1i1p1	RCA4	Canadian Centre for Climate Modelling / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
NorESM1-M	r1i1p1	RCA4	Norwegian Meteorological Institute / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
GFDL-ESM2M	r1i1p1	RCA4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) / Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)

Table A.2. Activité des feux observés en zone Sud-Est : dans la zone (1148 pixels SAFRAN) et pendant la période (27 mai-5 novembre)

Metrique	2004-2019 ¹	2001-2019 ²	1993-2002 ³	1993-2003
N1ha (par an)	206	281	310	330
N100ha (par an)	8.43	13.8	14.6	17.9
Surfaces brûlées (ha/an)	6030	10900	9870	14300

¹ La version de Firelihood utilisée dans cette étude est représentative de la relation feu-climat quasi stationnaire observée pendant la période (2004-2019) (retenue pour les comparaisons dans les Figures 2 et 3)

² Observations 2001-2020 (qui inclut l'évolution très marquée de la relation feu-climat avant 2004 et l'année 2003 exceptionnelle)

³ Observations correspondant à 1993-2002, présentant davantage d'activité des feux que 2004-2019, alors que le danger a nettement augmenté (Castel-Clavera et al. 2022)

Annexe B. Projection de l'activité des feux par zones (données quantitatives)

Zone Sud-Est

Table B.1. Augmentation d'activité des feux selon le RCP 8.5 en zone Sud-Est (en moyenne annuelle pour des périodes de 20 ans)

Métriques	2001-2020	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090
N1ha	180	193 (+6.87%)	204 (+13.2%)	219 (+21.7%)	242 (+34.3%)	264 (+46.2%)	284 (+57.4%)	319 (+76.7%)	354 (+96.6%)
N10ha	29.1	32.0 (+9.93%)	34.5 (+18.3%)	38.5 (+32.2%)	44.7 (+53.6%)	50.2 (+72.1%)	56.1 (+92.5%)	66.3 (+128%)	76.8 (+164%)
N100ha	6.26	7.00 (+11.8%)	7.61 (+21.6%)	8.75 (+39.9%)	10.5 (+67.1%)	11.9 (+89.6%)	13.6 (+117%)	16.5 (+163%)	19.5 (+211%)
N1000ha	0.965	1.07 (+11.0%)	1.16 (+20.3%)	1.31 (+35.9%)	1.54 (+59.8%)	1.73 (+79.3%)	1.95 (+102%)	2.32 (+140%)	2.71 (+180%)
Surfaces brûlées (ha)	4880	5420 (+11.0%)	5860 (+20.2%)	6640 (+36.2%)	7820 (+60.2%)	8800 (+80.4%)	9960 (+104%)	11900 (+144%)	13900 (+185%)
IFM "jour"	10.1	10.5 (+4.36%)	11.1 (+10.1%)	11.7 (+16.5%)	12.5 (+24.2%)	13.4 (+32.8%)	14.3 (+41.9%)	15.4 (+52.5%)	16.3 (+61.8%)

Table B.1bis. Même table que B.1 pour la sélection de modèles climatique INRAE (Pimont et al. 2022 ou pré-rapport d'août 2022). La comparaison avec la table B.1 permet d'évaluer les conséquences du changement de sélection de modèles climatiques (voir chapitre 2).

Métriques	2001-2020	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090
N1ha	183	200 (+9.01%)	212 (+15.7%)	230 (+25.6%)	254 (+38.3%)	278 (+51.5%)	308 (+67.8%)	338 (+84%)	373 (+103%)
N10ha	29.8	34.3 (+15%)	37.1 (+24.2%)	41.5 (+38.9%)	47.9 (+60.5%)	54.4 (+82.3%)	62.9 (+111%)	71.8 (+141%)	82.7 (+177%)
N100ha	6.42	7.69 (+19.8%)	8.39 (+30.6%)	9.51 (+48.1%)	11.3 (+75.5%)	13 (+103%)	15.4 (+140%)	18 (+180%)	21.2 (+229%)
N1000ha	0.994	0.994 (+16.6%)	1.16 (+26%)	1.25 (+41.8%)	1.41 (+65.7%)	1.65 (+88.5%)	1.87 (+120%)	2.19 (+153%)	2.92 (+194%)
Surfaces brûlées (ha)	5010	5870 (+17.1%)	6360 (+27.0%)	7160 (+43.1%)	8370 (+67.2%)	9570 (+91.1%)	11200 (+123%)	12900 (+157%)	15000 (+200%)
IFM "jour"	10.2	10.7 (+4.82%)	11.4 (+11.1%)	12.1 (+18.4%)	13 (+26.5%)	13.9 (+35.5%)	14.9 (+45.5%)	16 (+56%)	16.9 (+64.9%)

Table B.2. Augmentation d'activité des feux selon le RCP 4.5 en zone Sud-Est (en moyenne annuelle pour des périodes de 20 ans)

Métriques	2001-2020	2020	2030	2040	2050	2060	2070	280	2090
N1ha	181	192 (+6.26%)	210 (+16.3%)	228 (+26.3%)	235 (+30.1%)	235 (+30.0%)	239 (+32.5%)	237 (+31.1%)	235 (+30.3%)
N10ha	29.0	31.5 (+8.67%)	36.3 (+25.4%)	40.9 (+41.2%)	42.5 (+46.9%)	42.6 (+47.2%)	43.9 (+51.6%)	43.2 (+49.2%)	42.6 (+47.2%)
N100ha	6.21	6.84 (+10.2%)	8.18 (+31.6%)	9.36 (+50.7%)	9.78 (+57.5%)	9.84 (+58.3%)	10.2 (+64.9%)	10.1 (+61.9%)	9.85 (+58.5%)
N1000ha	0.971	1.06 (+8.89%)	1.23 (+27.1%)	1.39 (+42.8%)	1.44 (+47.9%)	1.45 (+49.6%)	1.52 (+56.1%)	1.48 (+52.4%)	1.45 (+49.6%)
Surfaces brûlées (ha)	4870	5320 (+9.3%)	6240 (+28.1%)	7050 (+44.8%)	7320 (+50.3%)	7380 (+51.5%)	7670 (+57.5%)	7510 (+54.3%)	7380 (+51.6%)
IFM "jour"	10.2	10.6 (+4.12%)	11.1 (+9.32%)	11.7 (+14.5%)	12.0 (+18.0%)	12.2 (+19.7%)	12.3 (+20.6%)	12.3 (+20.7%)	12.4 (+21.4%)

Table B.2bis. Même table que B.2 pour la sélection de modèles climatique INRAE (Pimont et al. 2022). La comparaison avec la table B.2 permet d'évaluer les conséquences du changement de sélection de modèles climatiques (voir chapitre 2).

Métriques	2001-2020	2020	2030	2040	2050	2060	2070	280	2090
N1ha	185	199 (+7.67%)	218 (+18.1%)	238 (+28.8%)	245 (+32.5%)	243 (+31.9%)	252 (+36.3%)	254 (+37.8%)	253 (+37%)
N10ha	30.0	33.4 (+11.3%)	38.4 (+28.2%)	43.3 (+44.5%)	45.1 (+50.4%)	44.8 (+49.4%)	46.8 (+56%)	47.7 (+59%)	47.3 (+57.9%)
N100ha	6.48	7.37 (+13.6%)	8.73 (+34.6%)	9.99 (+54.0%)	10.4 (+61.1%)	10.4 (+59.9%)	10.9 (+68.6%)	12.2 (+72.6%)	11.1 (+70.8%)
N1000ha	1.0	1.12 (+11.5%)	1.31 (+30.4%)	1.47 (+46.7%)	1.52 (+51.9%)	1.52 (+52%)	1.61 (+60.2%)	1.63 (+62.6%)	1.61 (+61%)
Surfaces brûlées (ha)	5050	5660 (+12.2%)	6620 (+31.2%)	7490 (+48.3%)	7770 (+54.0%)	7750 (+53.6%)	8160 (+61.6%)	8300 (+64.5%)	8230 (+63%)
IFM "jour"	10.4	10.8 (+4.51%)	11.4 (+10.3%)	12.0 (+15.8%)	12.4 (+19.4%)	12.6 (+21.7%)	12.8 (+23.3%)	12.9 (+24%)	12.9 (+24.6%)

Zone Sud-Ouest

Table B.3. Augmentation d'activité des feux selon le RCP 8.5 en zone Sud-Ouest (en moyenne annuelle pour des périodes de 20 ans)

Métriques	2001-2020	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090
N1ha	86.8	95.6 (+10.2%)	99.0 (+14.1%)	104 (+19.8%)	116 (+33.9%)	123 (+41.5%)	132 (+51.7%)	147 (+69.3%)	156 (+79.4%)
N20ha	3.44	3.78 (+10.1%)	3.95 (+14.9%)	4.17 (+21.4%)	4.68 (+36.3%)	5.01 (+45.8%)	5.41 (+57.5%)	6.12 (+78.1%)	6.53 (+90.1%)
N100ha	0.971	1.10 (+13.3%)	1.16 (+19.6%)	1.24 (+27.6%)	1.42 (+46.1%)	1.55 (+59.5%)	1.72 (+76.7%)	1.98 (+104%)	2.13 (+119%)
Surfaces brûlées (ha)	791	906 (+14.5%)	953 (+20.5%)	1020 (+29.2%)	1190 (+50.4%)	1360 (+72.3%)	1550 (+95.7%)	1800 (+128%)	1950 (+147%)
IFM "jour"	3.38	3.58 (+5.88%)	3.79 (+12.3%)	4.05 (+19.9%)	4.39 (+29.8%)	4.73 (+40.0%)	5.08 (+50.5%)	5.48 (+62.2%)	5.80 (+71.5%)

Table B.4. Augmentation d'activité des feux selon le RCP 4.5 en zone Sud-Ouest (en moyenne annuelle pour des périodes de 20 ans)

Métriques	2001-2020	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090
N1ha	85.8	91.3 (+6.44%)	97.6 (+13.7%)	107 (+24.4%)	108 (+25.8%)	106 (+23.1%)	110 (+27.8%)	110 (+27.7%)	108 (+26.1%)
N20ha	3.36	3.60 (+6.97%)	3.86 (+14.9%)	4.23 (+25.9%)	4.30 (+27.8%)	4.22 (+25.5%)	4.43 (+31.8%)	4.41 (+31.2%)	4.29 (+27.7%)
N100ha	0.941	1.02 (+8.22%)	1.12 (+19.2%)	1.24 (+32.2%)	1.26 (+34.3%)	1.24 (+32.2%)	1.33 (+41.1%)	1.32 (+40.4%)	1.28 (+35.5%)
Surfaces brûlées (ha)	745	828 (+11.1%)	914 (+22.6%)	1020 (+37.0%)	1040 (+40.1%)	1030 (+38.3%)	1110 (+49.3%)	1090 (+45.7%)	1030 (+38.1%)
IFM "jour"	3.33	3.51 (+5.42%)	3.72 (+12.0%)	3.94 (+18.5%)	4.05 (+21.7%)	4.09 (+22.9%)	4.14 (+24.5%)	4.16 (+25.2%)	4.17 (+25.3%)

Annexe C. Figures similaires à celles du matériel principal pour le RCP 4.5 (quand celles-ci sont présentées pour le RCP 8.5 dans le matériel principal) ou pour d'autres métriques que les exemples présentés dans le matériel principal

ZONE SUD-EST

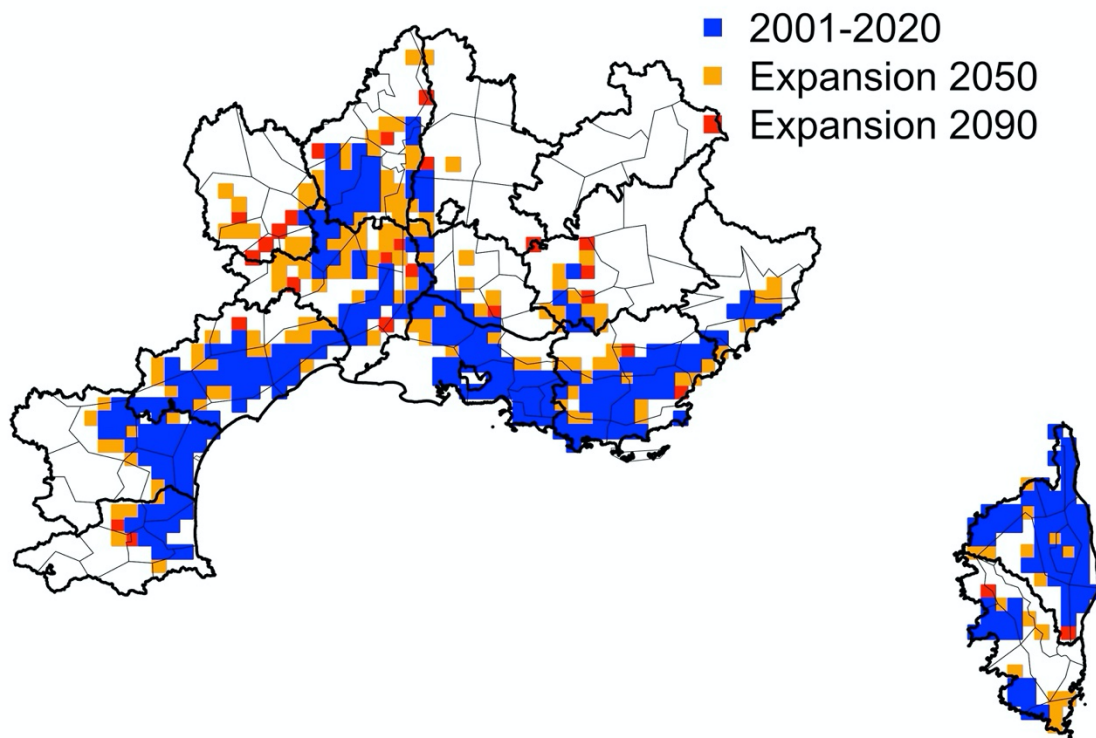


Figure C.1. Même figure que **Fig. 3.8** pour RCP 4.5

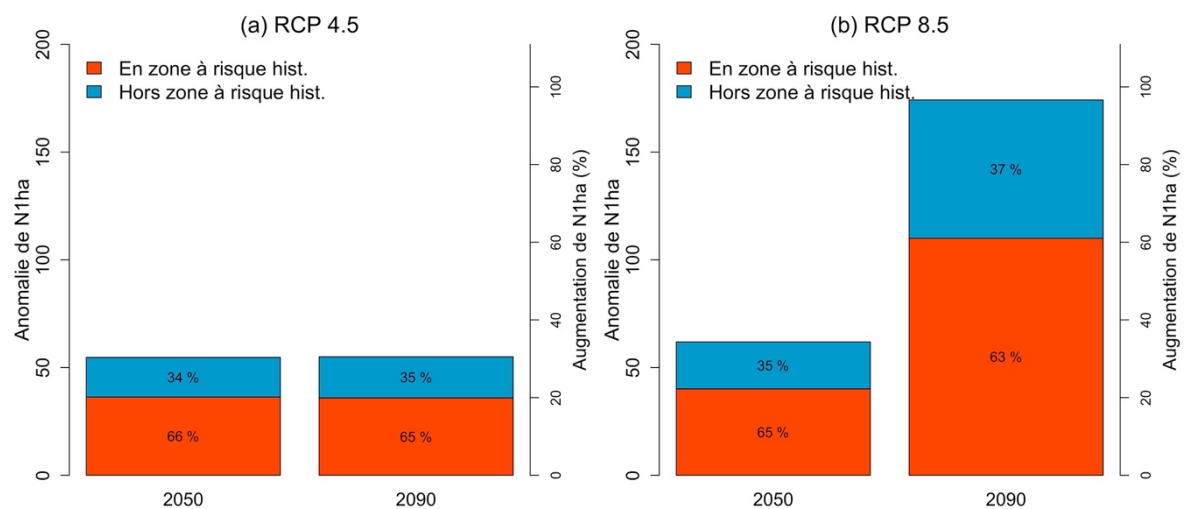


Figure C.2. (Même figure que la **figure 3.11** pour N1ha) Anomalies de N1ha sous l'effet du changement climatique, distribuées par rapport à la zone à risque historique (2001-2020) en rouge, pour les scénarios 4.5 et 8.5.

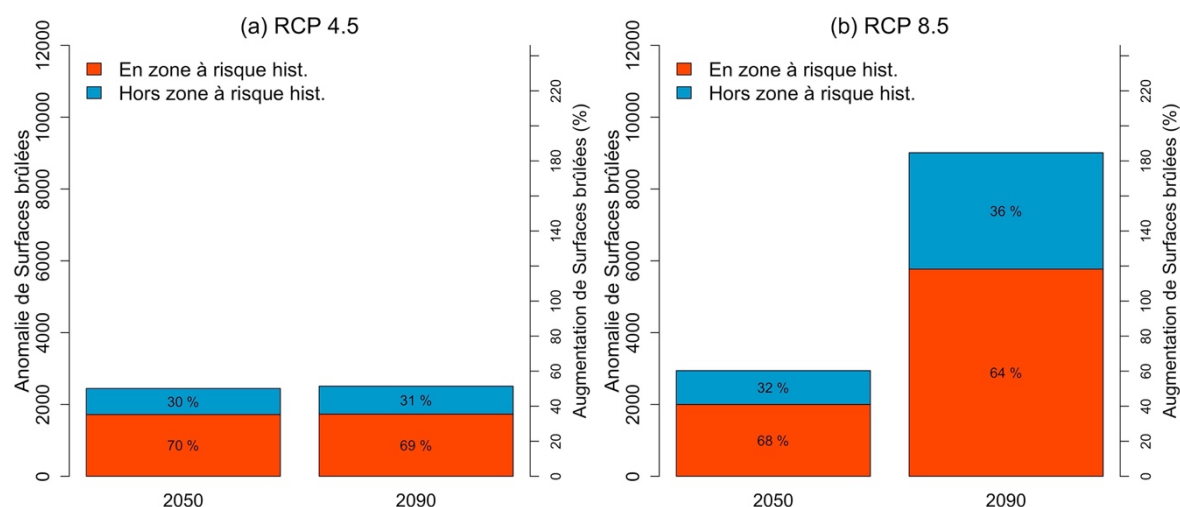
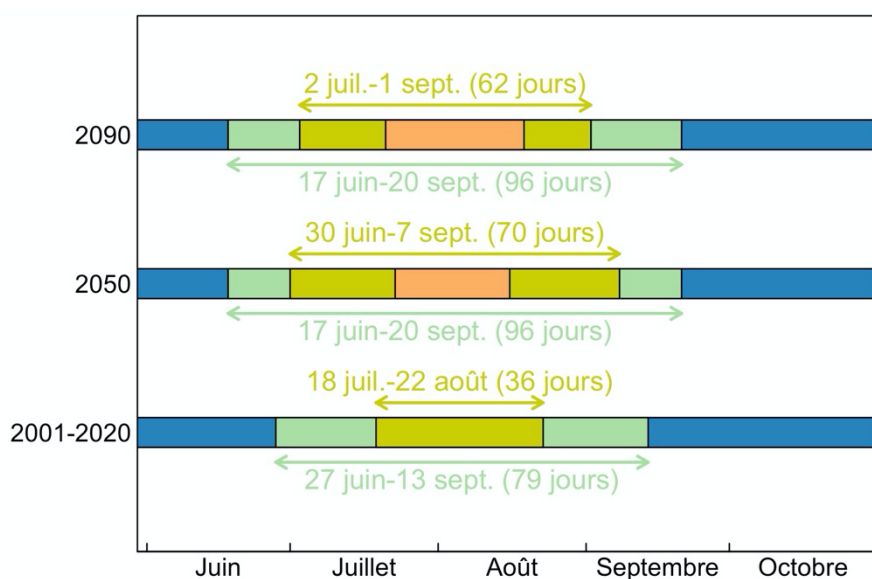


Figure C.3. (Même figure que la **figure 3.11** pour les surfaces brûlées) Anomalies de surfaces brûlées sous l'effet du changement climatique, distribuées par rapport à la zone à risque historique (2001-2020) en rouge, pour les scénarios 4.5 et 8.5.



Niveau	Activité feux de forêts				
	Faible	Modéré	Fort	Très fort	Extrême
N1ha (par jour de l'année)	0.63	1.3	2	2.9	3.9
N100ha (par jour de l'année)	0.015	0.05	0.091	0.16	0.26
Surfaces brûlées (ha par jour)	13	39	67	110	180

Figure C.4. (Même figure que **Fig. 3.12** pour RCP 4.5)

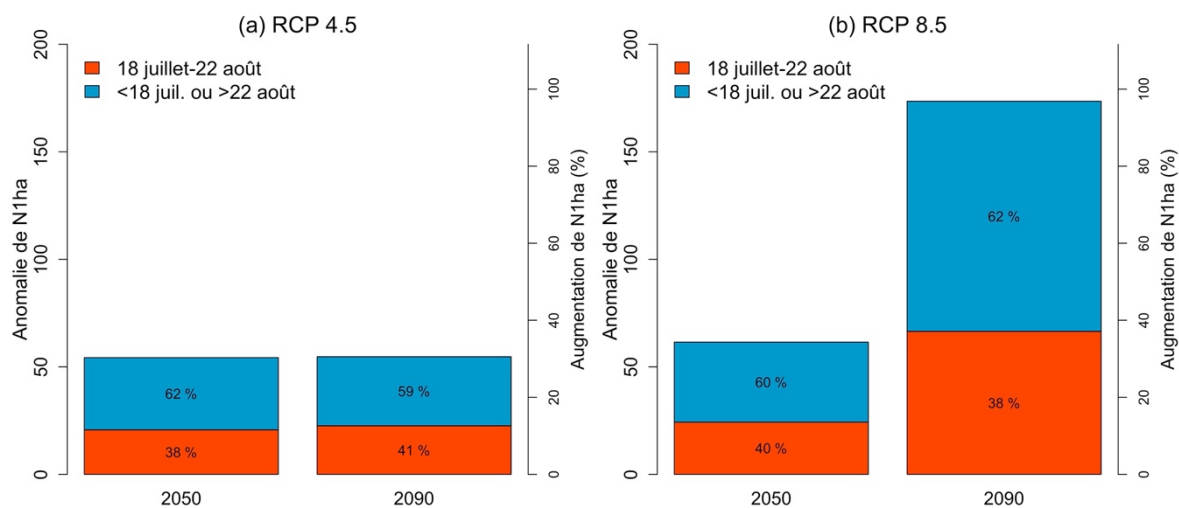


Figure C.5. (Même figure que la **figure 3.15** pour N1ha)

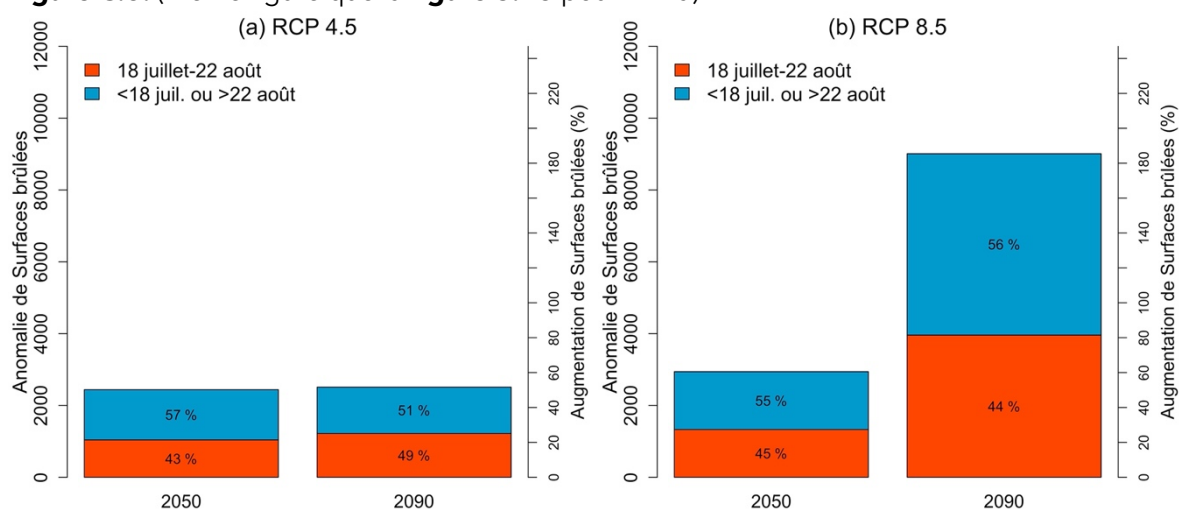


Figure 3.6. (Même figure que la **figure 3.15** pour les surfaces brûlées)

ZONE SUD-OUEST

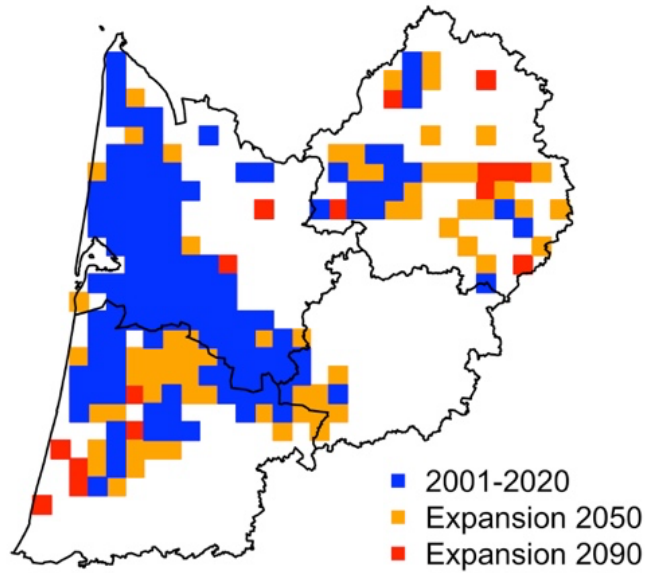


Figure C.7. Même figure que **Fig. 4.8** pour RCP 4.5

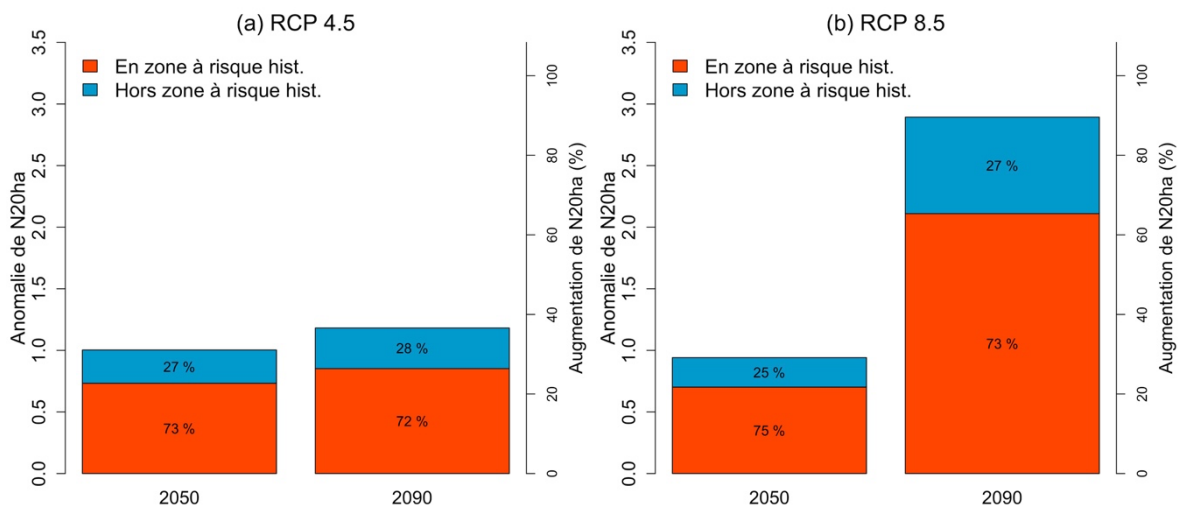


Figure C.8. (Même figure que la **figure 4.10** pour N20ha) Anomalies de N20ha sous l'effet du changement climatique, distribuées par rapport à la zone à risque historique (2001-2020) en rouge, pour les scénarios 4.5 et 8.5.

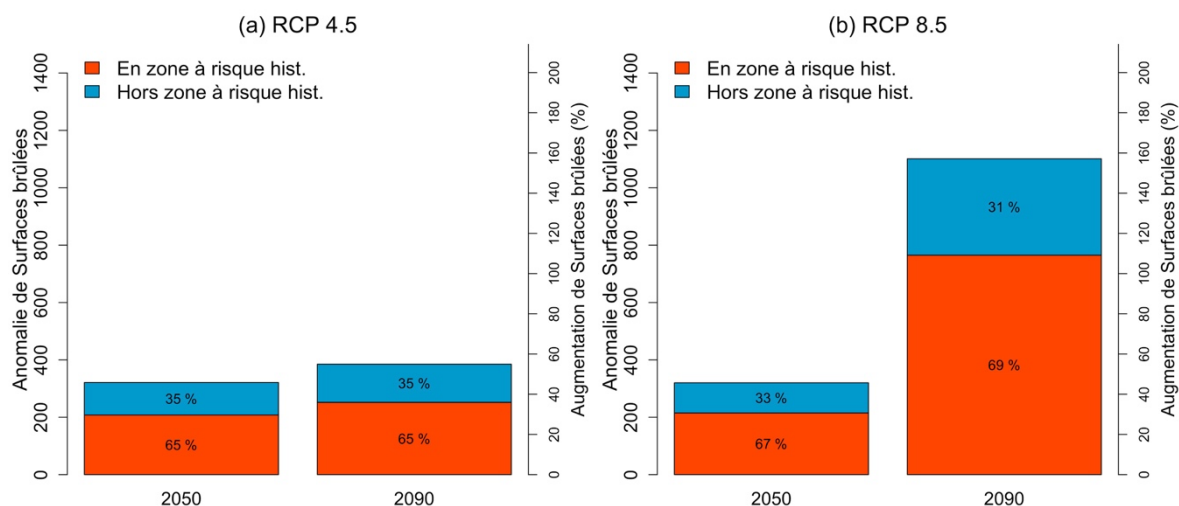


Figure C.9. (Même figure que la **figure 4.10** pour Surfaces brûlées) Anomalies de surfaces brûlées sous l'effet du changement climatique, distribuées par rapport à la zone à risque historique (2001-2020) en rouge, pour les scénarios 4.5 et 8.5.

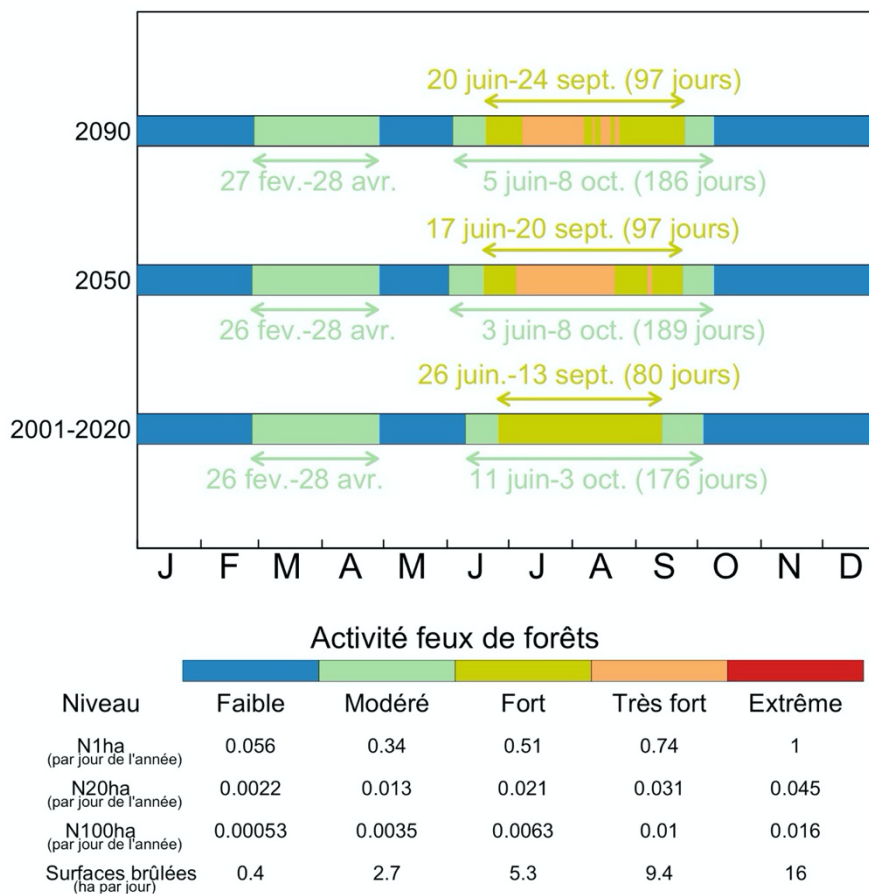


Figure C.10. (Même figure que **Fig. 4.13** pour RCP 4.5)

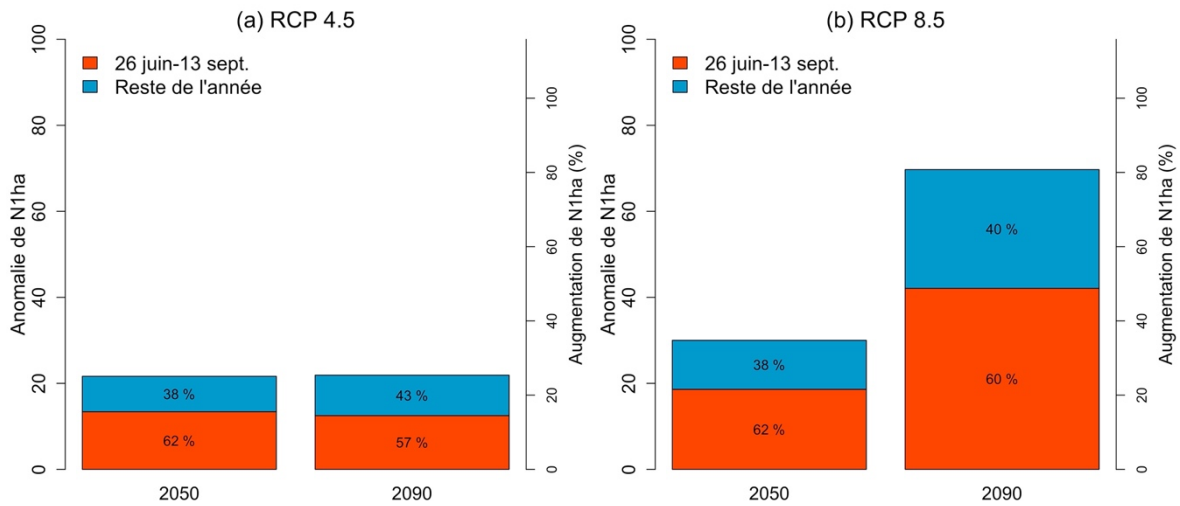


Figure C.11. (Même figure que Fig. 4.15 pour N1ha)

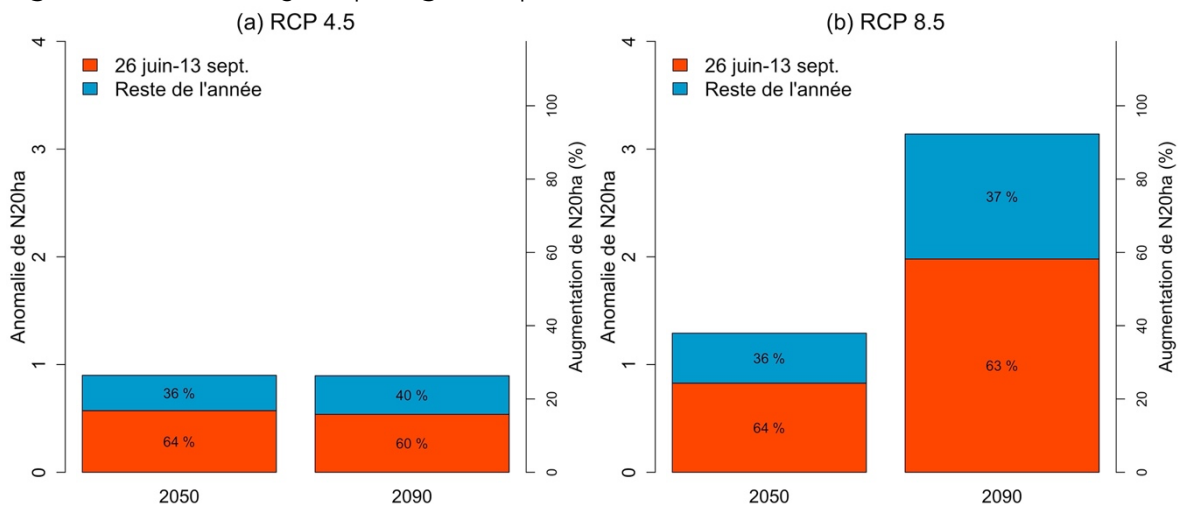


Figure C.12. (Même figure que Fig. 4.15 pour N20ha)

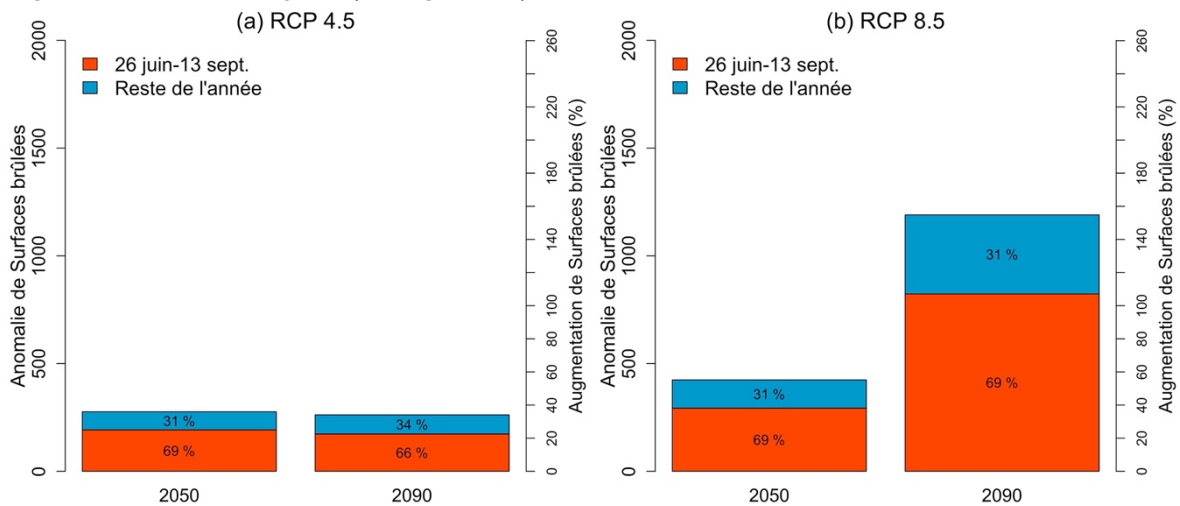


Figure C.13. (Même figure que Fig. 4.15 pour les surfaces brûlées)

Annexe D. Éléments méthodologiques liés à l'étude « France entière »

Construction d'un jeu de données feux de référence hors zones Sud-Est et Sud-Ouest sur la période 2008-2020

Contours ONF feux estivaux >20ha (dont plus de 10ha en milieu naturel)
(hors Sud-Ouest et Sud-Est, 2008-2020)

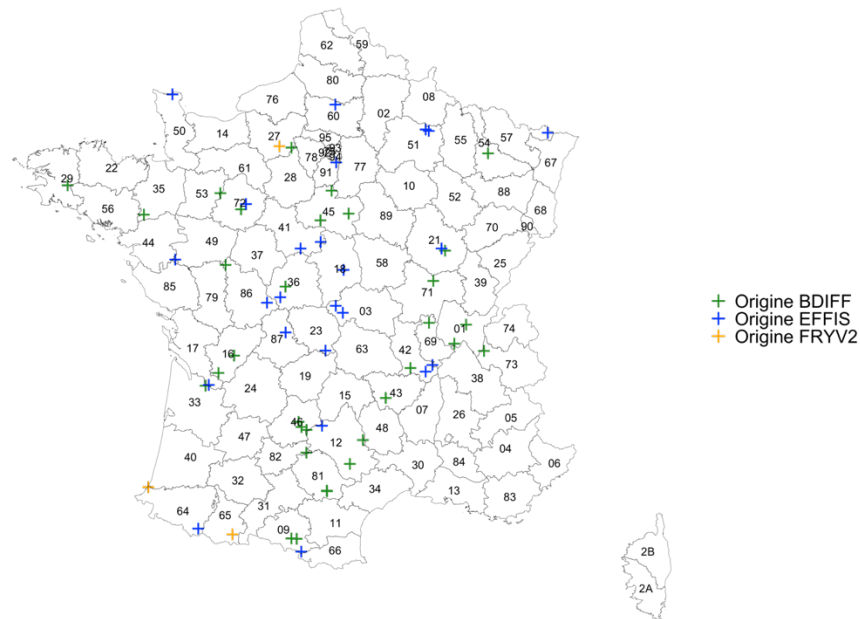


Fig. D1. Feux de plus de 20 ha présentant au moins 10 ha de milieu naturel : position des contours de feux de l'ONF hors zones Sud-Est et Sud-Ouest correspondant à des feux « estivaux » (fin mai-début novembre) entre 2008 et 2020, ainsi que la source de l'alerte ayant permis de reconstituer le contour.

Evaluation du modèle N> 20 ha sur la période 2008-2020

Table D1. Comparaison des performances de différents modèles probabilistes des feux N> 20 ha, en fonction de différentes métriques du danger météorologique (différentes variantes de l'IFM, pris en moyenne estivale ou en nombres de jours au-dessus de différents seuils). Ces résultats montrent que les métriques en moyenne estivale sont de meilleurs prédicteurs des N> 20 ha que les dépassements de seuil, l'IFM « jour » en moyenne estivale étant la métrique la plus performante.

Métrique du danger	log-Loss Skill Score (%)	AUC	AIC	BIC
IFM "jour" (Moyenne estivale)	100.0	0.9332	4382	4662
IFMx (Moyenne estivale)	90.1	0.9319	4403	4676
IFM12 (Moyenne estivale)	89.0	0.9317	4404	4676
IFM12 (jours>20 estival)	89.0	0.9314	4404	4684
IFMx (jours>30 estival)	85.7	0.9320	4417	4722
IFM12 (jours>40 estival)	81.3	0.9311	4428	4732
IFMx (jours>50 estival)	38.5	0.9233	4511	4784
IFM12 (jours>60 estival)	23.1	0.9206	4539	4788
IFMx (jours>80 estival)	13.2	0.9186	4555	4781
sans IFM (référence nulle)	0.0	0.9172	4582	4798

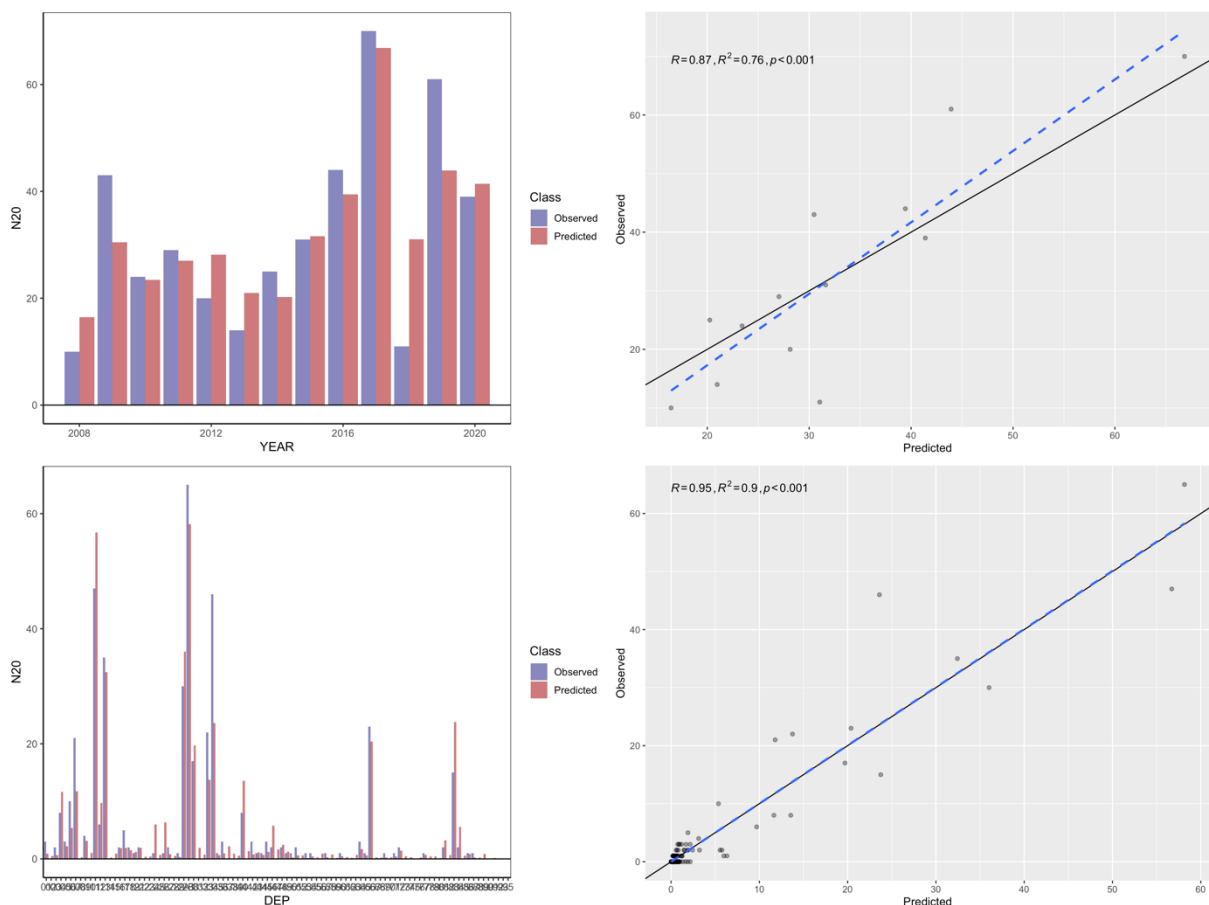


Fig. D2. Comparaison des données de la base par rapport aux prédictions du modèle national utilisant IFMx (moyenne estivale), sensibilité brute, couvert forestier et effet spatial. Les corrélations temporelles (par années, en haut) et

spatiales (par département, en bas) avec les données d'observations de feux sont très bonnes.

Table D2. Nombres de feux > 20 ha par département et par an pour la période historique 2001-2020 (climatologie observée SAFRAN) et pour les projections du RCP 4.5 et 8.5 à différents horizons, pour les 46^{ème} à 90^{ème} départements présentant la plus forte activité N20 en climatologie observée.

DEP	Climatologie réelle 2001-2020	2010 (RCP8.5)	2030 (RCP8.5)	2050 (RCP8.5)	2070 (RCP8.5)	2090 (RCP8.5)	2010 (RCP4.5)	2030 (RCP4.5)	2050 (RCP4.5)	2070 (RCP4.5)	2090 (RCP4.5)
42	0.095	0.075	0.088	0.130	0.180	0.280	0.076	0.090	0.130	0.120	0.130
65	0.094	0.080	0.100	0.140	0.200	0.340	0.081	0.100	0.130	0.140	0.160
15	0.088	0.080	0.100	0.150	0.210	0.320	0.079	0.097	0.140	0.140	0.150
71	0.088	0.069	0.080	0.130	0.160	0.250	0.069	0.083	0.120	0.110	0.130
44	0.084	0.100	0.120	0.170	0.210	0.290	0.100	0.120	0.150	0.160	0.180
01	0.081	0.100	0.120	0.190	0.240	0.380	0.110	0.130	0.180	0.170	0.180
03	0.080	0.052	0.063	0.099	0.130	0.200	0.053	0.065	0.091	0.089	0.099
39	0.079	0.076	0.085	0.140	0.170	0.260	0.075	0.089	0.130	0.120	0.130
52	0.074	0.052	0.062	0.100	0.120	0.180	0.056	0.067	0.091	0.091	0.099
77	0.073	0.070	0.082	0.130	0.150	0.210	0.077	0.081	0.110	0.120	0.130
51	0.071	0.052	0.058	0.093	0.100	0.140	0.056	0.060	0.082	0.084	0.090
23	0.070	0.057	0.071	0.110	0.150	0.220	0.058	0.072	0.100	0.100	0.110
85	0.069	0.035	0.044	0.063	0.080	0.110	0.038	0.043	0.056	0.060	0.061
10	0.068	0.052	0.059	0.095	0.110	0.160	0.055	0.062	0.085	0.086	0.094
35	0.063	0.081	0.095	0.140	0.180	0.240	0.089	0.095	0.120	0.140	0.150
69	0.061	0.037	0.043	0.066	0.087	0.140	0.037	0.044	0.062	0.058	0.066
32	0.060	0.042	0.056	0.081	0.110	0.160	0.044	0.056	0.070	0.073	0.078
27	0.060	0.054	0.063	0.096	0.120	0.160	0.059	0.061	0.086	0.092	0.099
87	0.059	0.054	0.069	0.100	0.140	0.200	0.057	0.069	0.096	0.096	0.100
28	0.056	0.049	0.060	0.088	0.110	0.150	0.053	0.056	0.080	0.085	0.090
25	0.052	0.043	0.047	0.076	0.092	0.140	0.042	0.050	0.073	0.069	0.070
73	0.046	0.055	0.064	0.094	0.120	0.180	0.054	0.066	0.090	0.086	0.094
60	0.046	0.040	0.046	0.071	0.081	0.110	0.044	0.047	0.063	0.066	0.073
61	0.042	0.045	0.053	0.080	0.100	0.140	0.049	0.052	0.073	0.080	0.082
78	0.040	0.035	0.043	0.063	0.075	0.100	0.039	0.040	0.056	0.060	0.065
22	0.035	0.043	0.051	0.076	0.098	0.140	0.046	0.051	0.066	0.075	0.076
29	0.035	0.036	0.045	0.067	0.086	0.120	0.039	0.044	0.056	0.064	0.065
02	0.033	0.028	0.032	0.052	0.056	0.080	0.031	0.033	0.046	0.046	0.051
55	0.033	0.022	0.025	0.041	0.048	0.065	0.024	0.026	0.036	0.038	0.040
76	0.033	0.035	0.040	0.059	0.070	0.096	0.037	0.039	0.053	0.056	0.061
88	0.032	0.025	0.028	0.046	0.054	0.076	0.026	0.030	0.042	0.042	0.043
50	0.031	0.019	0.021	0.030	0.036	0.049	0.021	0.022	0.026	0.028	0.030
91	0.030	0.029	0.035	0.052	0.061	0.085	0.032	0.033	0.047	0.049	0.053
74	0.029	0.035	0.039	0.061	0.075	0.110	0.034	0.041	0.057	0.055	0.059
70	0.027	0.022	0.026	0.042	0.050	0.075	0.023	0.027	0.039	0.038	0.039
57	0.026	0.018	0.021	0.034	0.039	0.053	0.020	0.022	0.030	0.032	0.032
67	0.025	0.017	0.020	0.032	0.036	0.048	0.019	0.021	0.029	0.029	0.030
54	0.024	0.016	0.018	0.030	0.035	0.048	0.018	0.019	0.026	0.027	0.029
62	0.023	0.017	0.018	0.028	0.031	0.041	0.018	0.018	0.025	0.026	0.028
14	0.021	0.026	0.031	0.045	0.055	0.075	0.029	0.030	0.039	0.044	0.045
53	0.021	0.025	0.029	0.044	0.054	0.074	0.027	0.029	0.039	0.043	0.044
80	0.020	0.019	0.021	0.032	0.036	0.049	0.020	0.021	0.029	0.031	0.032
59	0.019	0.017	0.019	0.029	0.031	0.041	0.018	0.019	0.027	0.027	0.029
08	0.017	0.014	0.016	0.026	0.029	0.039	0.016	0.017	0.023	0.023	0.025
68	0.016	0.011	0.012	0.019	0.022	0.032	0.011	0.013	0.018	0.018	0.017



INRAE Centre PACA
84000 AVIGNON
Contact : francois.pimont@INRAE.fr

Rejoignez-nous sur :

