Canadian Journal of Forest Research

Scénarios de probabilité et puissance potentielle des feux de végétation dans le département des Landes, France

Journal:	<i>Canadian Journal of Forest Research</i>
Manuscript ID	cjfr-2018-0223.R1
Manuscript Type:	Article
Date Submitted by the Author:	08-Aug-2018
Complete List of Authors:	<p>Parisient, Marc-Andre; Natural Resources Canada, Canadian Forest Service</p> <p>Robinne, François-Nicolas; University of Alberta, Renewable Resources</p> <p>Perez, Jean-Yves; Service Départemental Incendie et Secours des Landes</p> <p>Denave, Bruno; Préfecture de la Région Aquitaine, Etat-Major Interministériel de la Zone de Défense et de Sécurité Sud-Ouest, Préfecture de la Gironde</p> <p>DeLancey, Evan; Alberta Biodiversity Monitoring Institute, ;</p> <p>Doche, Clément; Météo-France, Direction Antilles-Guyane</p>
Keyword:	Probabilité d'incendie, puissance du feu, météo des feux, allumages, modèle de simulation
Is the invited manuscript for consideration in a Special Issue? :	Not applicable (regular submission)

SCHOLARONE™
Manuscripts

Scénarios de probabilité et puissance potentielle des feux de végétation dans le département des Landes, France

***Marc-André Parisien^{1*}, François-Nicolas Robinne², Jean-Yves Perez³, Bruno Denave⁴,
Evan R. DeLancey⁵, Clément Doche⁶***

¹. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, 5320-122e rue Edmonton, AB, Canada, T6H 3S5. Email : marc-andre.parisien@canada.ca

². Partenariat Scientifique Canadien pour les Feux de Forêt, Université de l'Alberta, Département des Ressources Renouvelables, 751 General Services Building, Edmonton, AB CANADA T6G 2H1 Email : robinne@ualberta.ca

³. Service Départemental Incendie et Secours des Landes, Rocade - Rond-Point de Saint Avit - BP 42 - 40001 Mont de Marsan Cedex. Email : jean-yves.perez@sdis40.fr

⁴. Préfecture de la Région Aquitaine, Etat-Major Interministériel de la Zone de Défense et de Sécurité Sud-Ouest, Préfecture de la Gironde, Esplanade Charles de Gaulle, 33077 Bordeaux Cedex. bruno.denave@interieur.gouv.fr

⁵. Alberta Biodiversity Monitoring Institute, University of Alberta, Biological Sciences CW-312J, Edmonton, AB T6G 2E9

⁶. Météo-France, Direction Antilles-Guyane, BP 645 97262 Fort-de-France cedex. Email : clementdoche@icloud.com

*auteur-correspondant

RÉSUMÉ

Le Sud-Ouest de la France n'a pas connu d'incendie majeur depuis plusieurs décennies, mais il présente un fort potentiel de feu de grande ampleur. Cette menace concerne la sécurité de la population qui augmente significativement lors de la saison estivale touristique, ainsi que les ressources forestières considérables de cette région. Largement utilisée en Amérique du Nord, la modélisation de la probabilité d'incendies de végétation à l'échelle du paysage est désormais une méthode éprouvée pour la cartographie du risque feu de forêt. La présente étude vise à adapter le modèle de probabilité canadien Burn-P3 au contexte géographique du département des Landes, en France, afin de calculer la probabilité d'incendie et la puissance potentielle (considérés ici comme les deux composantes majeures de l'aléa) des feux pour divers scénarios météorologiques. Pour ce faire, le principal défi fut de convertir les formations végétales du secteur landais en combustibles forestiers issus de la méthode canadienne. Les résultats montrent une probabilité d'incendie et une puissance du front de flamme très variables à travers le paysage, ces deux composantes ayant des configurations spatiales fort différentes. De plus, l'aléa feu de forêt augmente rapidement et de façon non-linéaire en fonction de la sévérité croissante des conditions météorologiques. Ces résultats représentent une première cartographie détaillée de la probabilité de feux de forêts dans le Sud-Ouest de la France. Celle-ci pourra être utilisée à des fins d'analyse des risques et pour guider des actions de mitigation ciblées afin d'améliorer la sécurité des personnes et optimiser la protection du massif forestier.

MOTS-CLES

Probabilité d’incendie, puissance du feu, météo des feux, allumages, modèle de simulation,
Département des Landes

ABSTRACT

Although the Southwest region of France has not experienced a major wildfire in several decades, the wildfire potential of this area remains high. This threat represents a matter of human safety, especially given the substantial influx of tourists during the summer season, but also affects the region’s important forest resources. Often used in North America, the modelling of wildfire probability at the landscape scale is now a widely understood method for wildfire risk analysis. The aim of this study is to adapt Burn-P3, a Canadian model for burn probability mapping, to the geographic context of the Landes department, France, in order to calculate wildfire probability and potential fire intensity (considered together as the two main components of wildfire hazard) for several weather scenarios. This exercise involved a conversion of the vegetation of the Landes region to the fuel types of the Canadian method. They reveal a highly heterogeneous wildfire probability and head fire intensity across the study landscape, with the two modelled components exhibiting divergent spatial configurations. Results also show a rapid and non-linear increase in wildfire risk according to the severity of weather conditions. These results represent the first detailed mapping of wildfire risk in Southwestern France using a probabilistic simulation model. This product can be readily integrated in a risk analysis and guide targeted mitigation actions to improve the human safety and optimize the protection of forest resources.

43

44 **KEYWORDS**

45 Fire probability, fire intensity, fire weather, ignitions, simulation models, Département des

46 Landes

47

48 **INTRODUCTION**

49 De nombreuses régions du monde naturellement adaptées à un régime de feu actif n'ont
50 connu que peu, voire aucun grand feu depuis des décennies, parfois des siècles (Marlon et al.
51 2008). Cette réduction de l'activité des feux s'explique par de nombreuses causes. Certaines,
52 telles que la prévention des allumages et la lutte contre les incendies, ont un effet direct, tandis
53 que d'autres, telles que la modification des paysages naturels, agissent de façon indirecte sur le
54 régime de feu (Parisien et al. 2016). Dans certains secteurs d'Europe épargnés par les feux
55 depuis plusieurs décennies, un nombre d'actions concrètes ont mené à cette diminution: la
56 prévention active (p. ex., sécurisation des lignes électriques et chemins de fer, entretien des
57 pistes forestières, nettoyage des déchets de coupe), l'établissement de coupe-feux, y compris le
58 rajeunissement du combustible, et une lutte plus efficace soutenue par un système de
59 détection moderne et des prévisions météo spatialisées (Brotons et al. 2013, Curt et Fréjaville
60 2018). Néanmoins, le potentiel pour la survenance de grands feux échappant au contrôle des
61 sapeurs-pompiers persiste, menaçant gravement les personnes et les biens dans des espaces
62 toujours plus anthropisés. De plus, on observe actuellement une recrudescence de grands feux
63 dans des endroits où leur activité naturelle avait été grandement réduite, une tendance liée à la

fois au changement climatique accéléré des dernières décennies, ainsi qu'à une augmentation de l'inflammabilité des paysages, souvent due à des politiques d'exclusion des feux, à la reconquête végétale d'anciens territoires agricoles, et à la pression touristique (Moreira et al. 2010, 2011, Ganteaume et al. 2013, Higuera et al. 2015).

Le risque d'un grand feu "imprévisible" et destructeur est particulièrement accru sur le continent européen, étant donné la possible concomitance de conditions météorologiques exceptionnelles, de départs de feux multiples souvent liés à des actes de malveillance répétés, et la présence de touristes souvent peu informés, pour ne nommer que quelques facteurs (Modugno et al. 2016, Curt et Fréjaville 2018). En France, les incendies de forêts font l'objet d'une attention constante, notamment dans la moitié Sud du pays, où se concentrent formations arbustives (i.e., garrigues et maquis) et pinèdes pouvant soutenir des incendies rapides et intenses (Trabaud 1992). Cela dit, les méthodes d'évaluation de l'aléa feu de forêt en France sont loin d'être uniformes. Si, au niveau national, l'indice forêt-météo (IFM) (Van Wagner 1987) calculé par Météo-France permet une cartographie quotidienne du danger d'incendie basé sur les conditions météorologiques, les autres documents relatifs à la prévention du risque incendie varient dans les techniques appliquées pour l'évaluation spatiale de l'aléa. Les méthodes statistiques qui relient l'activité des feux à des normales climatiques et autres variables biophysiques (Mouillot et al. 2003, Ruffault et al. 2016) sont utiles pour la prévention et planification à long terme (décennales) mais ne permettent pas d'évaluer les effets directs des allumages et de la propagation des feux sur le paysage actuel. En contraste, des modèles dit de simulation peuvent évaluer la probabilité de feu en fonction des facteurs qui

affectent son comportement, c'est à dire la météo, le combustible et le relief, et ce, sur l'ensemble du territoire (Finney 2005).

En France, les méthodes quantitatives dérivées de la modélisation dynamique des incendies de forêts restent sous-exploitées. Largement utilisées en Amérique du Nord, mais aussi dans d'autres pays européens (p. ex., Italie, Portugal), elles permettent de simuler la propagation des feux à l'échelle du paysage en se basant sur la végétation ainsi que sur la répartition spatio-temporelle des allumages (Parisien et al. 2005, Finney 2005). Ces modèles s'avèrent fort utiles pour la gestion des ressources forestières et du risque feux de forêts, puisque leurs sorties proposent une cartographie détaillée qui peut être reliée aux caractéristiques du terrain (p. ex., peuplements forestiers, étalement périurbain) (Ager et al. 2010, Thompson et Calkin 2011). Bien que nécessitant une connaissance approfondie de l'environnement des feux (c.-à-d., la météo, le combustible et le relief), ces méthodes fournissent des résultats détaillés de l'aléa incendie et se prêtent très bien à l'évaluation de scénarios de danger. Par exemple, Salis et al. (2016) ont utilisé ces méthodes pour élaborer des scénarios de gestion du paysage du sud de l'Italie, tandis qu'Oliveira et al. (2016) les a utilisées pour mesurer la "diffusion" (c.-à-d., le risque provenant des régions voisines) de la probabilité de feu au Portugal.

L'étude présentée ci-après analyse la probabilité spatiale de l'aléa d'incendie dans le département des Landes, France. Nous avons adapté la structure des données de végétation pour leur utilisation dans un modèle de probabilité d'incendie développé par le Service canadien des forêts, Burn-P3. Ce modèle est basé sur le système canadien de Prévion du comportement des incendies (PCI), une méthode qui est utilisée sur une base opérationnelle

(c.-à-d., quotidienne) pour la lutte contre les feux dans l'ensemble du Canada depuis des décennies (Forêts Canada- Groupe de travail sur les dangers d'incendie 1992). L'utilisation de la méthode canadienne est avantageuse dans le Sud-Ouest de la France, puisque ses agences de lutte contre les feux utilisent déjà la méthode canadienne d'évaluation de danger de feu, l'Indice forêt-météo, depuis plusieurs années et sur une base quotidienne pour évaluer le potentiel d'éclosion et mobiliser les effectifs de lutte. De plus, la structure des stations forestières du massif forestier des Landes de Gascogne et leur propension aux feux de cimes se prêtent bien à un exercice d'adaptation de l'approche canadienne (Rigolot et Fernandes 2005). En effet, les plantations de pins maritimes (*Pinus pinaster*) qui prévalent dans cette zone s'apparentent à certaines pinèdes canadiennes ayant fait l'objet de nombreuses études depuis plusieurs décennies et dont le comportement des feux est désormais largement documenté (Van Wagner 1989, Hély et al. 2001, Stocks et al. 2004).

Le but premier de cette étude est de cartographier l'aléa feu de forêts, défini ci-après comme le produit de la probabilité d'occurrence et de la puissance du front de flamme, en fonction de scénarios météorologiques représentatifs du danger d'incendie. En premier lieu, il s'agira d'établir une évaluation de l'aléa (c.-à-d., des cartes) tenant compte de l'ensemble des données météorologiques journalières sur le territoire. Comme ce scénario tiendra compte de l'ensemble des conditions météorologiques, il sera considéré comme 'réaliste'. Les données quotidiennes du scénario réaliste seront par la suite stratifiées selon que le danger d'incendie soit modéré, élevé, extrême, ou d'une sévérité rare (scénario 'Hollywood') ; des scénarios pour lesquels l'aléa sera également cartographié. Nos hypothèses principales sont les suivantes : (1) la probabilité et la puissance des incendies vont fortement augmenter selon la sévérité du

scénario météorologique et (2) la configuration spatiale de l'aléa sera fortement variable, étant donné le niveau de complexité du couvert végétal. À la lumière de nos résultats, nous allons discuter de la nécessité d'intégrer de façon systématique la modélisation dynamique de l'aléa feu de forêt dans la mise en place des stratégies de prévention et de mitigation des risques d'incendie de forêt, particulièrement dans les espaces soumis à de fortes pressions anthropiques.

ZONE D'ÉTUDE

Le département des Landes, dans le Sud-Ouest de la France, couvre une superficie de 9243 km² (Fig. 1). La topographie générale du département, centrée sur une large plaine sableuse, est peu développée avec une altitude excédant rarement les 100 m. Seule la naissance du piémont pyrénéen dans le sud-est présente un relief plus accidenté pour une altitude maximum de 283 m. Le département est caractérisé par un climat résolument océanique: la température moyenne de 6°Celsius au mois de janvier et 21°Celsius au mois de juillet ; les précipitations moyennes annuelles sont importantes, de l'ordre de 1300 mm sur la côte Atlantique et 700 mm à l'intérieur des terres.

Le département des Landes abrite une large partie du massif forestier des Landes de Gascogne (MFLG), qui, avec 62% de sa superficie boisée, est le plus grand domaine boisé artificiel de l'Ouest de l'Europe. Officiellement créée en 1857 et couvrant plus d'un million d'hectares en forêt de production (~75 M de m³ sur pied), il est essentiellement planté en pins maritimes (*Pinus pinaster*), une essence forestière à croissance rapide et très bien adaptée aux

conditions environnementales de cette région de la façade atlantique (Centre Régional de la Propriété Forestière 2008). Le MFLG assure donc des fonctions importantes de production et l'industrie forestière y est dynamique. La forêt originelle d'essences feuillues, de chênes surtout, se limite aujourd'hui aux bords des cours d'eau bien drainés. Les espaces agricoles, principalement dédiés à la culture du maïs, couvrent plus de 20% du territoire.

Au 1^{er} janvier 2015, la population du département s'élevait à 405 200 habitants pour une densité de 44 habitants/km², soit une des plus faibles de France (Régnier 2016). L'étalement géographique est cependant important, accentué par une croissance démographique moyenne de 1.2% par an depuis 2000 ainsi que par les activités touristiques attirant près de 2 millions de personnes chaque année. Le réseau routier, long de 14 500 km, couvre l'ensemble du territoire, y compris les zones forestières. Ce dynamisme socio-économique de long terme du territoire landais influence le régime des feux, avec près de 50% des feux ≥ 0.5 ha recensés sur la période 2004-2014 d'origine humaine. En y associant les allumages causés par la foudre, la superficie totale incendiée par l'ensemble de ces feux dépasse les 3000 ha pour la même période, touchant principalement les pinèdes et les formations arbustives denses.

De par sa composition forestière presque exclusivement résineuse, le massif s'avère particulièrement sensible aux incendies de forêt (Groupement d'Intérêt Public Aménagement du Territoire et Gestion des Risques 2008). Bien que le feu fût utilisé longtemps comme outil de gestion de l'espace, la disparition de la société traditionnelle Landaise et le manque de clarté dans l'organisation des services de lutte contre l'incendie semblent avoir facilité l'avènement des « années de braise » de 1940 à 1949, totalisant un demi-million d'hectares brûlés (Dujas et

Traimond 1992, Arnould et al. 2002). Le décès de 82 personnes durant l'incendie de Saucats fut un drame régional, toujours présent dans les mémoires (Sargos 2004). Territoire attractif, le MFLG est aussi le théâtre de multiples mutations anthropiques qui multiplient les contacts entre homme et nature, en faisant potentiellement un des espaces les plus soumis aux risques d'incendie de forêt en France (Mora and Banos 2014). L'implication et la collaboration des différents services de l'état français dans la défense des forêts contre l'incendie depuis la deuxième moitié du XXème siècle ont permis de réduire sensiblement cet aléa naturel. Cependant, les tempêtes Lothar (1999) et Klaus (2009) ont gravement touchés le MFLG, Klaus elle-seule ayant affecté 595 000 ha, soit 40 Mm³, fragmentant en profondeur un couvert forestier sinon continu (Lucas 2009). Malgré des efforts importants investis dans la reconstitution du massif, certaines zones étaient encore en cours de nettoyage au moment de cette étude, laissant par endroit des résidus ligneux à même le sol. D'autres zones ont été récemment replantées et sont densément peuplées en jeune pins maritimes de même classe d'âge. La présence de ce type de stations forestières peut accroître la continuité et le volume combustible directement disponible pour les feux courants et par conséquent aggraver le danger d'incendie dans les peuplements non-matures.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Nous avons cartographié la probabilité d'incendie (PI) et la puissance du front de flamme (PF) pour cinq scénarios météorologiques. Ces cartes, produites pour l'ensemble d'une saison de feu (c.-à-d., une année), représentent en quelque sorte les conditions moyennes, puisqu'elles

193 intègrent un éventail représentatif de données météorologiques et d'allumages potentiels. En
194 premier lieu, un scénario 'réaliste' qui prend en compte l'ensemble des données
195 météorologiques disponibles a été produit. Ce scénario comprend donc toute la variabilité
196 quotidienne du danger d'incendie au cours de la saison de feu, sans séparer les journées à
197 potentiel de propagation faible de celles à propagation extrême. Quatre autres scénarios
198 représentant différents niveaux de danger de feu basés sur les conditions météorologiques ont
199 été élaborés et leurs résultats comparés à celui du scénario réaliste. Tous les résultats spatiaux
200 ont été produits avec le modèle de simulation des feux Burn-P3 (Parisien et al. 2005). Ce
201 modèle, basé sur des processus de type Monte Carlo, simule l'allumage et la propagation d'un
202 très grand nombre de feux sur une base horaire pour l'ensemble de l'année (en général,
203 l'année à venir). Cette 'année' est ensuite répétée des milliers de fois pour tenir compte des
204 phénomènes aléatoires contrôlant la variabilité des allumages et des conditions météo. Il nous
205 a fallu créer des intrants pour le modèle à partir de bases de données de feu, de végétation et
206 de météorologie. Nous avons tenu compte de deux aspects de la météorologie régionale pour
207 développer nos scénarios: les conditions quotidiennes alimentant la propagation et la durée
208 des feux (le nombre d'heures de propagation pour un feu donné). Pour isoler l'effet
209 météorologique sur la probabilité d'incendie et la puissance du front de flamme de chaque
210 scénario, tous les autres intrants de Burn-P3 demeurent constants.

211

212 **Données**

213 Pour créer les données d'entrée nécessaires à la modélisation sous Burn-P3, nous avons
214 rassemblé un certain nombre de données aux formats tabulaires et spatiaux (Tab.1).

215

216 *Feux*—La secteur d'étude connaît deux périodes distinctes dans l'année sujettes à un fort risque
217 feux de forêt : le printemps et l'été, avec des typologies différentes. Le printemps, au cours
218 d'une période qui s'étend en général du milieu du mois de mars au milieu du mois de mai,
219 connaît un nombre important de départs de feu. Il s'agit d'une particularité régionale, que l'on
220 ne retrouve pas dans la région méditerranéenne. Durant cette période, la végétation de la
221 strate herbacée est très sèche et facilement inflammable. Par ailleurs, les vents d'est sont
222 dominants, asséchant le terrain, et augmentent le risque de propagation. Les terrains sont
223 encore humides, et l'accessibilité à la forêt est réduite dans de nombreuses zones. Le risque
224 feux de forêt diminue avec le développement de la végétation de printemps. L'été, sur une
225 période courant de la fin du mois de mai à la fin du mois de septembre, voire octobre pour les
226 années à l'arrière-saison clémente, présente des caractéristiques différentes: fortes
227 températures, déficit hydrique des végétaux, orages fréquents. Durant ces périodes le risque
228 d'éclosion est supérieur, mais l'accessibilité au massif est en général meilleure qu'au printemps,
229 grâce à la portance des sols améliorée par la sécheresse.

230 Des données ponctuelles d'allumage de 2004 à 2014 ont été pourvues par le
231 Groupement d'Intérêt Public Aménagement du Territoire (GIP-ATEGERI) et le Service
232 Départemental d'Incendie et Secours des Landes (SDIS40). Chaque point comporte des attributs

nécessaires à l'élaboration des intrants Burn-P3: la date d'éclosion, la cause de l'allumage (c.-à-d., naturelle ou humaine) et la superficie finale de l'incendie. Ces données ont fait l'objet d'un contrôle qualité, mais il existe vraisemblablement des inexactitudes, notamment au niveau des très petits feux (<0.5 ha), qui ne peuvent pas tous être répertoriés.

Couvert végétal—Plusieurs types de données ont dû être combinés afin d'obtenir une carte complète du couvert végétal du territoire. Le GIP-ATEGERI a fourni la cartographie des îlots forestiers reconstitués (i.e., nettoyés et replantés) depuis les deux tempêtes de 1999 et 2009. Des données supplémentaires sur l'état de la végétation sur le département ont été obtenues par l'intermédiaire du SDIS40. Il s'agit du relevé par télédétection de l'ensemble des dégâts occasionnés sur le MFLG durant les tempêtes et tel qu'établi par l'Inventaire Forestier National (IFN), et de la cartographie des stations forestières pour lesquelles le nettoyage des chablis a été jugé nécessaire. Finalement, l'Institut Géographique National (IGN) a fourni un Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 10 mètres (Fig.2-b), ainsi qu'une cartographie générale de la végétation pour le département, issue de la base de données topographique nationale, BD-TOPO. Les données géographiques ont été projetées dans le système de coordonnées RGF-Lambert-93, converties au format raster, et ré-échantillonnées à 100 mètres de résolution.

Météorologie—Les données météorologiques, nécessaires au calcul des conditions d'allumage et de propagation d'un incendie, ont été fournies pour cinq stations de mesures par le service national français Météo-France. Ces stations de mesures répondent aux critères de certification définis par l'Organisation Mondiale de la Météorologie. Les données s'étendent sur la période

1984 à 2014. Elles comportent les mesures suivantes, toutes répertoriées à midi, heure locale : la température, l'humidité relative, la vitesse et la direction des vents et les précipitations des dernières 24 heures. À celles-ci s'ajoutent les composantes du système canadien de l'indice forêt-météo (IFM) (Van Wagner 1987), qui furent calculées à l'aide du package 'cffdrs' (Wang et al. 2017) du logiciel R (R Core Team 2014). L'IFM est composé de trois indices décrivant l'humidité des sols (couches superficielles, intermédiaires et profondes) et trois indices reliés au comportement potentiel du feu, dont l'IFM, qui décrit de façon générale le danger de feu. Nous n'avons tenu compte que des conditions météorologiques pour les journées entre le 15 mars et le 15 octobre, soit la période où se déclarent la quasi-totalité des feux. Météo-France a également fourni le découpage départemental utilisé (ci-après, 'zones météo') pour le calcul quotidien de l'IFM (Fig.2-c).

Modèle Burn-P3

Mécanique du modèle—Nous avons utilisé le logiciel Burn-P3 (Parisien et al. 2005) pour calculer la probabilité d'incendie et la puissance potentielle du front de flamme. Burn-P3 est un modèle de simulation des feux qui se sert de l'algorithme de propagation Prometheus (Tymstra et al. 2010) pour simuler les allumages et la croissance d'un très grand nombre de feux (10^4 à 10^6 feux) dans un paysage donné. La succession végétale post-incendie ne fait pas partie de ce modèle, celui-ci se concentrant plutôt sur les processus influençant la répartition géographique des feux à haute résolution spatiale. Le résultat principal de Burn-P3 est une surface de probabilité d'incendie par pixel pour une année donnée (p. ex., l'année à venir). De plus, le

276 modèle peut générer plusieurs autres sorties telles que la puissance du front de flamme,
277 utilisée dans cette étude. Contrairement à la nature dichotomique (brûlé ou non-brûlé) de la PI,
278 la PF procure une mesure qui peut être reliée aux impacts écologiques des feux (p. ex., la
279 biomasse consumée, la hauteur des flammes, la mortalité des arbres), à leur comportement, et
280 à l'efficacité de la lutte (Hirsch et al. 1998) (voir Cartographie de l'aléa).

281 Burn-P3 simule les feux pour une année, mais répète celle-ci un grand nombre de fois
282 (c.-à-d., 'itérations') en fonction de la variabilité possible dans les allumages, tant au niveau
283 temporel (c.-à-d., saisonnier) que spatial, et de la variation quotidienne de la météo. Chaque
284 itération représente donc une réalisation stochastique des feux pour une seule année (en
285 général, celle à venir). Par exemple, une itération pourrait modéliser une année de feu
286 "modérée" dans laquelle seulement quelques feux brûlent selon des conditions peu propices
287 aux grands feux, tandis que l'itération suivante pourrait simuler une année de feu "extrême"
288 durant laquelle un grand nombre de feux brûlent, certains d'entre eux selon des conditions
289 menant à de vastes étendues incendiées. Ici, nous avons simulé 20 000 itérations pour chaque
290 scénario. La PI est calculée pour chaque pixel en divisant le nombre de fois que celui-ci a brûlé
291 par le nombre d'itération (et multiplier par 100 pour obtenir un pourcentage). Lors de la
292 simulation, le calcul de la PF est fait pour chaque pixel selon la méthode PCI (Groupe de travail
293 sur les dangers d'incendie 1992), c'est à dire en fonction du type de combustible, de la météo, du
294 relief (p. ex., les pentes ascendantes brûlent plus intensément). La PF finale est calculée en
295 prenant la moyenne des valeurs de PF de chaque pixel pour l'ensemble des feux simulés.

296 Des études ont démontré que l'exactitude des valeurs de PI issues des modèles de
297 simulation est largement dépendante de notre capacité à intégrer la variabilité naturelle selon

laquelle les feux s'allument et se propagent (Lertzman et al. 1998, Parisien et al. 2010). Afin de modéliser le plus fidèlement possible cette variabilité, tous les intrants de Burn-P3 sont créés à partir de données historiques décrivant l'environnement contemporain des feux dans le secteur d'étude. Ceux-ci sont en effet généralisés pour que le logiciel puisse simuler un très grand nombre de conditions plausibles, sans se contenter d'une simple duplication des feux du passé. Comme la PI réelle englobe un nombre infini de réalisations aléatoires (c.-à-d., toutes les combinaisons de périmètres de feu possibles), il est essentiel que notre calcul soit basé sur un nombre d'allumages suffisamment grand pour bien caractériser cette variabilité. En somme, les intrants de Burn-P3 et ses processus de simulation, tels que décrits ci-dessous et représentés dans l'Annexe A, sont conçus pour capter les fluctuations interannuelles du régime de feu, ainsi que celles des feux d'une même itération (c.-à-d., intra-annuelles).

Le modèle général d'une simulation comprend quatre étapes. Premièrement, le nombre de feux est tiré d'une probabilité de fréquences basée sur des données historiques (Fig. 3b) et pour chacun de ces feux, la saison et la cause sont attribuées selon une probabilité de fréquence pour chaque combinaison de celles-ci. La prochaine étape consiste à attribuer des coordonnées géographiques au point d'allumage de chaque feu à partir de grilles de probabilités d'allumages de cause humaine ou naturelle. Pour la troisième étape, la durée est tirée pour chaque feu selon une distribution de fréquences du nombre d'heures de propagation; ces distributions varient en fonction des saisons. Finalement, Burn-P3 sélectionne des conditions météorologiques quotidiennes pour chaque feu simulé en fonction de la saison et de l'emplacement géographique (c.-à-d., une des cinq zones météo) (Annexe A).

320 *Création d'intrants*—Les variables spatiales ont été créées avec une zone tampon de 10 km
321 autour du département, afin de prendre en compte les incendies se propageant depuis
322 l'extérieur et ainsi éviter les effets de bordure. Les allumages ont été répartis en deux groupes,
323 selon qu'ils soient naturels (c.-à-d., foudre ; 55% des allumages) ou anthropiques (45%), et un
324 raster de densité a été créé pour chaque cause avec un filtre noyau d'un rayon de 25 km
325 (Fig.2-d,e).

326 La création des combustibles du système PCI pour les Landes a requis plusieurs étapes.
327 Développé au Canada, le système PCI décrit des mesures du comportement des feux, telles que
328 la vitesse de propagation, le volume de combustible consommé, ou encore la puissance du front
329 de flamme, en fonction de variables météorologiques et de la topographie pour un ensemble
330 de combustibles préétablis (Groupe de travail sur les dangers d'incendie 1992). Comme il
331 n'existe pas en France de cartographie des combustibles similaire au système PCI, nous avons
332 combiné les diverses informations relatives à la végétation (p. ex., composition en espèce,
333 structure verticale et horizontale des peuplements) pour produire une variable de combustibles
334 au format raster. La conversion du type de végétation à un combustible de la méthode PCI s'est
335 faite par l'étude des feux par retour d'expérience et par la connaissance locale de la réaction
336 aux feux des strates herbacées et arbustives. De plus, des feux expérimentaux ont été réalisés
337 de 1994 à 2000 pour étudier ces comportements. Quoiqu'aucune mesure n'ait été effectuée
338 sur le terrain dans le cadre de cette étude, plusieurs caractérisations qualitatives de la
339 végétation (c.-à-d., des visites sur le terrain) ont été effectuées par les auteurs. Au final, la mise
340 au point d'une table de conversion des types de végétation français vers les combustibles

canadiens a permis de classifier la végétation des Landes selon le schéma utilisé pour le système PCI (Annexe B).

Les ouragans de 1999 et 2009 ont sévèrement affecté la couverture forestière du MFLG, pour des raisons liées à la sensibilité des peuplements de pin maritime au vent (Bélouard et al. 2012). Afin de représenter ces changements toujours visibles dans le paysage en date de l'étude, la couche des dégâts forestiers de l'IFN a été combinée à la couche végétation de la BD-TOPO afin de délimiter d'une part les espaces combustibles et non-combustibles du département et, d'autre part, les zones touchées par les tempêtes et dont la variabilité des dégâts complexifiait l'agencement des combustibles. Pour ces dernières, la localisation des îlots de nettoyage et de reconstitution a fourni l'information nécessaire pour la détermination des combustibles dans les zones les plus durement touchées et qui ont fait ou font toujours l'objet de mesures particulières de gestion forestière (Fig.2-a).

Le nombre de feux simulés dans chaque itération est tiré d'une distribution de fréquence du nombre d'incendies par année. Cette distribution est basée sur les données historiques; par contre, nous avons effectué un lissage pour créer une distribution de fréquence constante pour les années avec un nombre moyen ou inférieur à la moyenne de feux et les années avec un nombre de feux plus élevé que la moyenne (Fig. 3b). Seuls les feux de ≥ 0.5 ha ont été utilisés pour créer les intrants de cette étude. Ces feux représentent la quasi-totalité (97.3%) de la superficie brûlée dans le secteur d'étude.

Scénarios météo

Le scénario réaliste est basé sur la totalité de la période de feu de 1984 à 2013. Celle-ci dure, en moyenne, du 15 mars au 15 octobre, et est divisée en trois saisons : (i) le début du printemps (15 mars au 14 mai), (ii) la fin du printemps (15 mai au 14 août) et (iii) l'été (15 août au 15 octobre). Durant cette période, seules les conditions journalières problématiques, c'est-à-dire, celles pouvant théoriquement produire un feu de ≥ 0.5 ha, ont été intégrées dans le modèle. Le seuil utilisé pour discerner les 'journées de propagation' est d'un score IFM de 13, une valeur propre au secteur d'étude et basée sur les dires d'experts, mais qui est semblable à la valeur médiane (IFM = 15) d'une journée de propagation, tel que définie par Podur and Wotton (2011), au Canada. Il n'est pas exclu que des feux se propagent en deçà de ces conditions (IFM de 13), mais ces feux peuvent être assez facilement contenus par les sapeurs-pompiers. Les autres scénarios représentent une stratification additionnelle en fonction du danger des feux, tel que décrite dans le Tableau 2.

Les scénarios modéré, élevé, extrême, et Hollywood sont créés selon une échelle croissante de sévérité des conditions météorologiques et chacun s'avère être une tranche de conditions du scénario réaliste (Tableau 2). Cette échelle est basée sur des barèmes établis par Alexander et de Groot (1988) pour décrire le comportement potentiel des feux dans les pinèdes canadiennes. L'échelle est jugée pertinente pour le secteur d'étude, vue la similarité entre les pinèdes canadiennes et ses plantations de pins maritimes, ainsi que la capacité du système canadien de Préviation du comportement des incendies à prédire le comportement des feux dans les Landes, selon des observations de grands feux récents. Le scénario Hollywood, qui a pour but de représenter les conditions les plus extrêmes, c'est à dire celles qui peuvent survenir à plusieurs années d'intervalles, fut élaboré de façon légèrement différente aux autres

scénarios. Dans la base de données météo, comme seulement deux journées satisfont le critère IFM pour le scénario Hollywood au début du printemps, une deuxième condition a été élaborée pour cette saison : les valeurs d'indice de propagation initiale (IPI) de 12 ou plus ont été retenues. L'IPI, qui est sensible aux grands vents, décrit bien les journées à fort danger de feux au printemps, saison relativement venteuse.

Par ailleurs, la durée moyenne des feux varie d'un scénario à l'autre selon une distribution du nombre d'heures de propagation quotidien (Fig. 3c). Ces distributions varient également entre les saisons pour tenir compte des variations saisonnières dans le potentiel de combustion. Le scénario Hollywood est unique dans la mesure où les feux ont une faible probabilité de se propager sur plus d'une journée (deux jours=0.75% ; trois jours=0.25%).

Cartographie de l'aléa

L'aléa est composé de deux volets. Le premier se focalise sur la probabilité incendie (PI) et le second sur la puissance du front de flammes (PF), ce dernier représentant une mesure de l'impact potentiel, tant au niveau écologique qu'au niveau de la lutte; par exemple, à 4000 kW/m la lutte directe devient difficile, tandis qu'à 10,000 kW/m on peut s'attendre à voir des comportements de feu extrêmes et même erratiques rendant la lutte directe essentiellement impossible (Hirsch et al. 1998). L'union de ces deux aspects produit une cartographie de l'aléa feu de forêt (Finney 2005). Pour ce faire, la carte des PI est classée en quatre catégories selon les ruptures naturelles dans la distribution des valeurs. La carte des PF est quant à elle classée en quatre catégories selon les limites de puissance conditionnant les capacités de lutte. La carte résultante donne, par pixel, une valeur unique combinant PF et PI.

Pour illustrer le concept de l'aléa en fonction de la sévérité des conditions météo (c.-à-d., les scénarios), différentes combinaisons de classes de probabilité et de puissances sont présentées. La présentation des résultats par scénarios comprend également une carte additionnelle : la probabilité d'incendie normalisée, où les probabilités brutes seront transformées pour que toutes les cartes de scénarios aient la même moyenne et écart-type. Le but de ces cartes est, dans un premier temps, de pouvoir mieux observer la distribution spatiale des probabilités d'occurrence pouvant paraître uniformes dans les données brutes; dans un deuxième temps, d'identifier des zones de point chaud où les probabilités atteignent leurs valeurs maximales, et ce pour chaque scénario.

RÉSULTATS

La distribution spatiale de la PI et de la PF du scénario réaliste sont toutes deux fortement hétérogènes et différentes l'une de l'autre (Fig. 3a et b). La probabilité d'incendie moyenne est de 0.53% (écart-type=0.52), ce qui correspond à un intervalle de feux moyen de 189 années (Tableau 3). La puissance moyenne est de 2872 kW/m et 56% du paysage combustible a une valeur de plus de 4000 kW/m. Malgré une certaine correspondance entre les valeurs de ces deux variables (PI et PF), même une fois catégorisées en trois larges classes de valeurs, il existe des zones où la probabilité est élevée mais la puissance est faible et vice versa (Fig. 3c). Les pixels où la probabilité et la puissance sont élevées constituent les zones où l'aléa est le plus fort.

Les scénarios de danger de feu diffèrent l'un de l'autre, tant au niveau de la PI que de la PF (Fig. 4). En plus de la forte croissance de ces deux variables du scénario modéré au scénario Hollywood (probabilité moyenne=de 0.11 à 8.55; puissance moyenne=de 522 à 7832 kW/m), les distributions spatiales varient énormément. En effet, mis à part le piémont Pyrénéen situé au sud de la rivière Adour relativement ininflammable, l'augmentation du danger de feu semblent apporter plus d'uniformité dans la PI, du moins du côté des valeurs élevées (>5%). Par contre, lorsque les valeurs sont normalisées, on observe un résultat contraire : les valeurs élevées sont distribuées sur l'ensemble du paysage, tandis que pour les scénarios Extrême et Hollywood, celles-ci sont concentrées dans la partie centre-nord du territoire (soulignons que chaque carte de PI normalisée contient le même nombre de pixel de la même valeur/couleur) (Fig. 4). Quant à la PF, on observe une augmentation abrupte dans la moyenne des valeurs du scénario élevé au scénario extrême, signalant de probables difficultés à contenir l'avancée du front de flammes durant ces conditions météorologiques.

DISCUSSION

Variation spatiale de l'aléa feu dans les Landes

Les méthodes de cartographie de l'aléa incendie en France ont été majoritairement appliquées au Sud-Est méditerranéen, délaissant largement d'autres régions françaises pourtant sensibles aux incendies (Magnier 2011). L'intégration de la méthode canadienne d'évaluation du danger de feu de végétation ainsi que l'utilisation d'un logiciel de simulation des feux ont permis le calcul de l'aléa incendie dans le sud-ouest de la France. Les résultats de cette étude mettent en

447 évidence les importantes variations spatiales des composantes de l'aléa, soit la probabilité
448 d'incendie et la puissance du front de flamme. Cette forte variation dans la probabilité
449 d'incendie du paysage landais est donc similaire à celle qu'on retrouve dans des paysages
450 susceptibles aux feux de végétation appartenant à d'autres régions du globe (Parks et al. 2012,
451 Salis et al. 2012, Ager et al. 2014, Kalabokidis et al. 2016). Il est tout même important de
452 souligner que cette probabilité d'incendie est dynamique: elle est portée à varier d'une journée
453 à l'autre en fonction de la météo mais également à plus longue échelle spatiale en fonction de
454 changements de configuration du couvert végétal (Salis et al. 2014, Wang et al. 2016).

455 L'analyse de scénarios météo démontre que non seulement les valeurs moyennes de la
456 probabilité d'incendie et de la puissance du front de flamme augmentent rapidement selon la
457 sévérité des conditions quotidiennes, mais également que la configuration spatiale de ces
458 composantes de l'aléa change de façon assez dramatique du scénario modéré au scénario
459 extrême ou Hollywood. Lorsque les conditions sont moins extrêmes, les types de peuplements
460 ont un effet important sur la configuration spatiale de la probabilité mais cet effet est dilué
461 lorsque les conditions s'accroissent et que les feux deviennent moins sélectifs dans ce qu'ils
462 brûlent (Barros et Pereira 2014, Erni et al. 2016). Du côté de la probabilité, plus les conditions
463 sont extrêmes, plus les feux sont grands, plus les probabilités se concentrent dans le cœur du
464 massif forestier. La concentration de la probabilité dans les scénarios extrême et Hollywood
465 peut être attribuée à un autre phénomène: celui de l'effet de bordure créé par les parties non-
466 inflammables du paysage. Cet effet, décrit en premier lieu par Heinselman (1973), s'explique
467 par l'impossibilité d'allumage dans les zones non-combustibles et donc à l'absence de feux
468 provenant de région voisines. Dans notre secteur, cet effet de bordure naturel est causé par

l'océan Atlantique et, dans une moindre mesure, par la forte proportion de non-combustible dans certaines zones (p. ex., les Pyrénées), mais il peut aussi être plus localisé, en aval des cours d'eau, de caps rocheux ou de champs irrigués.

L'ajout de la puissance du front de flamme à la probabilité d'incendie permet d'obtenir une échelle quantitative de l'impact potentiel des feux (Ager et al. 2010) qui est reliée à la probabilité mais qui est fondamentalement différente. Par exemple, une zone peut brûler souvent mais avec des feux de faible puissance, cas typique en zone pastorale (Navarro et Pereira 2012, Fernandes et al. 2013). L'intégration de ces deux composantes est intéressante pour l'aménagement du territoire car elle permet d'identifier les différentes configurations de l'aléa et ainsi d'éclairer la prise de décisions quant à la prévention et la mitigation du risque feu de forêt. Les zones où la probabilité et la puissance sont élevées sont forcément d'un intérêt particulier mais d'autres où seulement la valeur d'une des deux composants est accrue peuvent également renseigner sur un problème éventuel. Là où les enjeux sont sensibles et où des vies humaines peuvent être en jeu (p. ex., à l'interface habitat-forêt, en zone touristique) la probabilité d'incendie revêt un caractère plus important pour les gestionnaires du risque, en dépit de la puissance potentielle (Alexander 1982). À l'inverse, il se peut que la puissance soit le facteur déterminant dans le processus décisionnel dans les cas où les enjeux menacés par les feux d'une puissance élevée soient particulièrement sensibles à l'impact des flammes, tant du point de vue écologique que du point de vue financier, tels que les massifs forestiers de production.

Utilisation pour la gestion des risques

491 Les sorties de modèles de simulation des feux tels Burn-P3 sont fort riches d'informations du
492 fait qu'elles cumulent des dizaines ou centaines de milliers de feux selon un nombre presque
493 illimité de permutations stochastiques représentant l'environnement des feux. L'utilité de ces
494 outils est habituellement conçue pour la planification stratégique, soit sur de longues plages
495 temporelles (habituellement l'année à venir). Par contre, en stratifiant la météo en fonction du
496 danger de feux, les cartes de probabilité et de puissance potentielles peuvent être reliées aux
497 prévisions quotidiennes et, par le fait même, leur utilité se rapproche des outils qui appuient la
498 lutte des feux au quotidien (c.-à-d., la planification tactique) (Finney 2005, Dunn et al. 2017).
499 Dans le contexte landais, il serait par exemple possible de planifier les schémas de coupe
500 forestière de façon à réduire l'aléa d'incendie (Hirsch et al. 2001, Rigolot et Morvan 2003). Les
501 résultats de Burn-P3 permettent par ailleurs de poser les bases d'une réflexion sur le
502 positionnement des coupures de combustibles, sur la priorisation des zones de nettoyage post-
503 tempête, et sur la réalisation des Plans de Prévention des Risques d'incendies de forêt (PPRif).
504 Ils pourraient, par exemple, guider la réintroduction de feux courants avec des feux prescrits,
505 une pratique encore largement utilisée en Europe pour la gestion des combustibles et souvent
506 associée à des activités sylvo-pastorales (Xanthopoulos et al. 2006). Ce type de gestion du
507 combustible dans les pinèdes à pin maritime a d'ailleurs été préconisé par Rigolot et Fernandes
508 (2005) ainsi que Fernandes et al. (2013).

509 Ce qui semble être une recrudescence d'incendies catastrophiques sur le continent
510 européen devant se poursuivre, voire s'aggraver dans le futur, cette situation pose de plus en
511 plus de défis pour les gestionnaires de paysage, propriétaires terriens et assureurs (Doerr et
512 Santín 2013). Le massif forestier des Landes de Gascogne est composé en grande partie de

massifs forestiers de production d'une importance capitale pour la filière bois française. Malgré la vulnérabilité de ce système forestier particulier, où l'exploitation forestière est fortement ancrée dans la culture régionale, il semble que la dynamique actuelle ne soit pourtant pas à l'adaptation (Cazals et al. 2013, Sansilvestri 2015). Alors que tout porte à croire que les perturbations forestières vont en s'accroissant (Seidl et al. 2014), notre approche devrait pouvoir fournir une base pour l'étude de différents itinéraires forestiers et les polices d'assurance associées aux peuplement dans des scénarios intégrant l'aléa actuel ainsi que de probables futurs changements dans les conditions de danger. L'intégration des pare-feux, un aspect important de la défense des forêts contre l'incendie dans le massif des Landes, dans la cartographie des combustibles serait également importante pour optimiser les résultats de la modélisation.

La forêt landaise est devenue un espace largement anthropisé, avec comme effet probable d'augmenter la densité et la fréquence des allumages, effet déjà largement documenté en zone méditerranéenne (Ganteaume and Jappiot 2013, Curt et al. 2016). La population du département est dynamique, avec une hausse annuelle de 1.2% par an, et l'activité touristique s'y est largement développée (Dehez 2010). La sécurité publique et la protection des infrastructures se retrouvent, de ce fait, au centre de la problématique incendie. De grands feux récents ayant causé des morts en Grèce (2009, 2018), en Espagne (2016) et au Portugal (2017) sont un triste rappel que ces incidents peuvent avoir lieu là où les feux ont été exclus pendant plusieurs décennies et que l'efficacité de la lutte est fortement compromise lorsque la météo est extrême (Viegas 2009, Lahaye et al. 2018). Les questions de gestion de la biodiversité sont également devenues prépondérantes dans la mise en place de gestion à long

terme des territoires forestiers (Timbal et Maizeret 1998, Deuffic et al. 2010). Les pinèdes sont donc des espaces aux forts enjeux économiques, sociaux, et environnementaux (Mora and Banos 2014), dans lequel l'incendie ne semble pas avoir sa place mais où la coexistence forcée semble pourtant indubitable (Moritz et al. 2014).

Limites et directions futures

Notre exercice de modélisation dynamique transposée au contexte français s'avère satisfaisant et informateur. Néanmoins, un certain nombre d'améliorations permettrait de faciliter l'adoption de ce type d'outils par les organismes de gestion des territoires forestiers en France. En premier lieu, l'adoption d'une nomenclature des combustibles nationaux supportée par des données spatiales de haute qualité limiterait l'incertitude liée à la transposition d'une nomenclature canadienne, mais aussi faciliterait la création des données d'entrée, pour le moment issues d'un mélange de données hétéroclites. L'effort investi dans le projet européen Fire Paradox et la création de la plateforme de connaissances sur les combustibles devraient pouvoir être adaptés pour ce type d'application (Silva et al. 2010). De plus, en France, les informations sur les surfaces brûlées et les informations géographiques afférentes couvrent souvent une période restreinte (p. ex., moins de 20 ans). Rassembler toutes les informations pertinentes à la création d'intrants, que celles-ci fassent l'objet d'une collecte rétrospective ou de capture de nouvelles données, constituerait donc une piste claire vers l'amélioration, ainsi que la calibration, des modèles de simulation des feux.

Les valeurs de probabilité d'incendie, et à un moindre niveau celles de la puissance du front de flamme, telles que calculées par Burn-P3 sont assurément surestimées pour le secteur landais. Ceci peut être attribué au fait qu'il est impossible de modéliser directement les techniques de lutte contre les feux de forêt dans ce logiciel. C'est d'ailleurs une limite des modèles simulant les feux au niveau du paysage: cette complexité est extrêmement difficile à intégrer de façon réaliste dans ces modèles (Ntamo et al. 2004, Podur et Martell 2007). Dans le secteur d'étude, il y a un maillage important de casernes de pompiers espacées de 15 à 20 km qui sont équipées d'une tour de détection et de caméras de surveillance. La réponse opérationnelle est proportionnée au niveau de risque quotidien. L'efficacité de la lutte contre les éclosions de feu dépend donc de la distance à la caserne, l'accessibilité du site, des effectifs sur place et du danger météo. Même s'il est impossible de tenir compte de tous ces facteurs, l'effet de la lutte sur la superficie des feux est néanmoins en partie reflété dans les intrants qui sont dérivés de feux ayant été affectés par la lutte. Par exemple, la durée de propagation serait vraisemblablement beaucoup plus longue, en moyenne, s'il n'y avait aucune lutte active. En somme, il faut considérer les probabilités d'incendie comme étant surestimées et, à cet effet, il reste préférable d'interpréter ces valeurs comme étant relatives plutôt qu'absolues.

Même si la végétation des Landes se prête en général assez bien à la méthode canadienne, certains types végétaux ne peuvent être adéquatement appariés aux combustibles de la méthode PCI. C'est en particulier le cas des formations arbustives, telles que celles composées de l'ajonc d'Europe (*Ulex europaeus*) ou du genêt à balais (*Cytisus scoparius*), qui sont mal représentées par cette méthode. Comme les modèles de type Burn-P3 sont sensibles à la configuration spatiale des combustibles (Cary et al. 2006, Parisien et al. 2011), les

577 inexactitudes de cet intrant peuvent avoir un effet important sur le calcul de la probabilité
578 d'incendie et la puissance du front de flamme. Heureusement, les formations arbustives ne
579 couvrent qu'une faible superficie du secteur. Cela dit, la méthode canadienne ne pourrait pas
580 facilement être adaptée à certains secteurs méditerranéens qui sont largement dominés par
581 une végétation arbustive ou des essences de feuillus à feuilles coriaces sempervirentes. La
582 création de combustibles faits sur mesure pour mieux représenter la variabilité observée sur le
583 terrain est d'ailleurs une priorité des spécialistes en comportement des feux et, d'ailleurs, ces
584 changements sont prévus dans la version (à venir) de la méthode canadienne.

585 Si la pertinence de la méthode canadienne dans la forêt landaise, tant au niveau de
586 l'Indice forêt-météo que du système de Prévion du comportement des incendies n'est pas
587 mise en doute, elle reste à être pleinement démontrée. Pour le même effet sur le terrain (p.
588 ex., niveau de sécheresse), les valeurs de leurs composantes peuvent varier d'une région à
589 l'autre, et ce même au Canada, où le système a été conçu (Wotton 2008). Dans les Landes,
590 l'Indice forêt-météo pose un problème au printemps, ce qui entraîna la mise en place d'un
591 nouvel indicateur, le Niveau d'éclosion et de propagation (NEP; basé en partie sur l'IFM) qui est
592 utilisé durant cette saison. Un apport continu d'observations des sapeurs-pompiers, en plus
593 d'une collecte de données de terrain, lorsque possible, constituerait une piste pour améliorer
594 l'utilisation de la méthode canadienne, et par extension, Burn-P3, dans le secteur. Cette
595 approche fut préconisée et éprouvée ailleurs dans le monde, notamment en Indonésie et
596 Malaisie (de Groot et al. 2007). D'autres sources d'informations déjà en place en France,
597 comme les observations détaillées d'une tour de flux, dont une est présente dans les Landes
598 depuis des décennies (Kowalski et al. 2003), ou encore les sorties de modèles physiques de feu

(p. ex., Firetec) (Pimont et al. 2012), peuvent également contribuer à solidifier le lien entre l'environnement des feux (c.-à-d., la météo, le combustible et le relief) et le comportement de ceux-ci aux des composantes des systèmes de l'IFM et du PCI. Par ailleurs, de nouvelles avancées en télédétection fournissent maintenant des mesures de comportement des feux difficiles à obtenir, en particulier au niveau de la puissance, très peu observée sur le terrain dans le secteur d'étude, via des capteurs infra-rouges (Johnston et al. 2017).

Notre étude se focalise ici uniquement sur l'aléa. Une étude approfondie prenant en compte les enjeux, c'est-à-dire les personnes et les biens exposés à l'aléa et leur vulnérabilité, pourrait permettre de réaliser une cartographie des interfaces habitat-forêt, ou plus globalement habitat-société (Lampin-Maillet et al. 2010, Robinne et al. 2016) à des fins de gestion de long terme du risque feu de forêt. Sur des aspects plus opérationnels, la création de scénarios intra-saisonniers, prenant en compte les fluctuations des conditions de danger météorologiques mais également des mouvements de touristes durant la saison estivale constitueraient une réelle plus-value pour la gestion des ressources humaines et matérielles. Enfin, le changement climatique en cours risque de favoriser la survenance de conditions dangereuses lors de la saison de feu, mais également d'augmenter la fréquence et l'intensité d'épisodes venteux dont les effets sur la structure des formations forestières landaises risquent de la rendre plus inflammable de façon épisodique (Lozano et al. 2017).

617

618 **CONCLUSION**

619 Cette étude représente un premier exercice de calcul probabiliste de l'aléa incendie dans le
620 sud-ouest de la France. Malgré les simplifications et compromis requis pour adapter la méthode
621 canadienne aux conditions climatiques et au complexes combustibles des Landes, nous avons
622 pu rassembler les données nécessaires à la modélisation spatiale. La méthode canadienne
623 d'évaluation de danger des feux de végétation est largement utilisée sur le plan international,
624 tant pour la gestion opérationnelle que stratégique, mais dans la quasi-totalité des cas cette
625 utilisation se limite à l'Indice Forêt-Météo, c'est-à-dire qu'elle n'évalue que le potentiel
626 météorologique. Dans cette étude nous avons pu maximiser l'utilisation de la méthode
627 canadienne avec l'utilisation du système PCI, qui, en intégrant l'information relative aux
628 combustibles, propose une évaluation quantitative du comportement des feux. Une fois
629 réalisée la conversion de la végétation des Landes vers les combustibles canadiens, il a fallu
630 développer les intrants décrivant la variabilité spatio-temporelle quotidienne des allumages et
631 de la météo—des données collectées en France depuis des décennies—pour rendre possible la
632 modélisation avec le modèle Burn-P3.

633 Les sorties Burn-P3 offrent une cartographie de la probabilité d'incendie et de la
634 puissance du front de flamme, que nous considérons ici comme les deux composantes de l'aléa
635 d'incendie, issues de la somme de centaines de milliers de feux simulés. Cette méthode,
636 proprement spatiale, tient compte de la configuration du paysage dans la simulation qu'elle fait
637 des allumages et de la propagation. De ce fait, elle offre la possibilité d'explorer des scénarios

d'évolution du territoire selon des modes de gestion des combustibles, de configuration météorologiques extrêmes (p. ex., climats futurs) et d'occupation du sol (p. ex, expansion des interfaces habitat-forêt). Les scénarios météo présentés dans cette étude démontrent la croissance "explosive" de la probabilité et de la puissance d'incendie en fonction de la sévérité des conditions météo quotidiennes. Si ces conditions sont rares, elles sont belles et bien réelles, et se sont manifestées lors de tous les feux catastrophiques des dernières années ailleurs en Europe. Il est donc impératif d'intégrer à la gestion des incendies sur le territoire landais non seulement les conditions extrêmes auxquelles nous sommes habituées, mais également celles, plus rares, qui pourraient alimenter de grands feux catastrophiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier SDIS40 (Landes) pour le financement de cette étude, ainsi qu'aux représentants de Météo-France, du SDIS40 et du SDIS33 (Gironde) pour plusieurs discussions qui ont menées à l'élaboration de ce projet. Nous sommes aussi reconnaissants à Julia Morin, du Groupement d'Intérêt Public Aménagement du Territoire et Gestion des Risques, pour avoir fourni les données de couvert végétal.

RÉFÉRENCES

Ager, A.A., Day, M.A., Finney, M.A., Vance-Borland, K., et Vaillant, N.M. 2014. Analyzing the transmission of wildfire exposure on a fire-prone landscape in Oregon, USA. *For. Ecol. Manage.* **334**: 377–390.

- 659 Ager, A.A., Vaillant, N.M., et Finney, M.A. 2010. A comparison of landscape fuel treatment strategies to
660 mitigate wildland fire risk in the urban interface and preserve old forest structure. *For. Ecol.*
661 *Manage.* **259**(8): 1556–1570.
- 662 Alexander, M.E. 1982. Calculating and interpreting forest fire intensities. *Can. J. Bot.* **60**(4): 349–357.
663 doi:10.1139/b82-048.
- 664 Alexander, M.E., et De Groot, W.J. 1988. Fire behavior in jack pine stands as related to the Canadian
665 Forest Fire Weather Index System. *Dans* Canadian Forestry Service, Northwest Region, Edmonton,
666 Alberta. Government of Canada, Edmonton, AB.
- 667 Arnould, P., Marty, P., et Simon, L. 2002. Deux siècles d'aménagements forestiers: Trois situations aux
668 marges méridionales de la France. *Eria* **58**: 251–267.
- 669 Barros, A.M., et Pereira, J.M., 2014. Wildfire selectivity for land cover type: does size matter?. *PloS one*,
670 **9**(1), p.e84760.
- 671 Bélouard, T., Marchadier, E., Merzeau, D., Meredieu, C., Brunet, Y., Drouineau, S., Paillassa, E., et Riou-
672 Nivert, P. 2012. Évaluation des facteurs de résistance au vent des peuplements de pin maritime
673 après la tempête Klaus à l'aide des données de l'inventaire forestier. *Édité par* Institut
674 Géographique National, Institut National de la Recherche Agronomique, Forêt Privée Française, et
675 Centre Régional de la Propriété Forestière. Région Aquitaine.
- 676 Brotons, L., Aquilué, N., De Cáceres, M., Fortin, M.J., et Fall, A., 2013. How fire history, fire suppression
677 practices and climate change affect wildfire regimes in Mediterranean landscapes. *PLoS ONE* **8**(5):
678 p.e62392.
- 679 Cary, G.J., Keane, R.E., Gardner, R.H., Lavorel, S., Flannigan, M.D., Davies, I.D., Li, C., Lenihan, J.M., Rupp,
680 T.S., et Mouillot, F. 2006. Comparison of the Sensitivity of Landscape-fire-succession Models to
681 Variation in Terrain, Fuel Pattern, Climate and Weather. *Landsc. Ecol.* **21**(1): 121–137.
682 doi:10.1007/s10980-005-7302-9.

- 683 Cazals, C., Deuffic, P., Sergent, A., et Ginelli, L. 2013. La forêt, un patrimoine au prisme de
684 l'écologisation : le cas des Landes de Gascogne. *VertigO - la Rev. électronique en Sci.*
685 l'environnement [En ligne] **Hors-Série** (juin).
- 686 Centre Régional de la Propriété Forestière. 2008. Le pin maritime - Pilier de l'économie forestière
687 d'Aquitaine. Bordeaux.
- 688 Curt, T., Fréjaville, T., et Lahaye, S. 2016. Modelling the spatial patterns of ignition causes and fire
689 regime features in southern France: implications for fire prevention policy. *Int. J. Wildl. Fire* **25**(7):
690 785–796.
- 691 Curt, T., et Fréjaville, T., 2018. Wildfire policy in Mediterranean France: how far is it efficient and
692 sustainable?. *Risk analysis*, **38**(3): 472-488.
- 693 De Groot, W.J., Field, R.D., Brady, M.A., Roswintarti, O., et Mohamad, M. 2007. Development of the
694 Indonesian and Malaysian fire danger rating systems. *Mitig. Adapt. Start. Gl.* **12**(1): 165.
- 695 Dehez, J. 2010. Les forêts d'Aquitaine : un patrimoine fréquenté. *Sud-Ouest Eur.* [En ligne] **30**.
- 696 Deuffic, P., Ginelli, L., et Petit, K. 2010. Patrimoine foncier... et naturel ? Les propriétaires forestiers face
697 à l'écologisation des Landes de Gascogne. *Sud-Ouest Eur.* **30**: 109–124.
- 698 Doerr, S.H., et Santín, C. 2013. Wildfire: A Burning Issue for Insurers? *Lloyd's, Londres*.
- 699 Dujas, J.-M., et Traimond, B. 1992. Le maître du feu. *Terrain* [En Ligne] (Octobre).
- 700 Dunn, C.J., Thompson, M.P., et Calkin, D.E. 2017. A framework for developing safe and effective large-
701 fire response in a new fire management paradigm. *For. Ecol. Manage.* **404**: 184–196.
- 702 Fernandes, P.M., Davies, M.G., Ascoli, D., Fernández, C., Moreira, F., Rigolot, E., Stoof, C.R., Vega José,
703 A., et Molina, D. 2013. Prescribed burning in southern Europe: developing fire management in a
704 dynamic landscape. *Front. Ecol. Environ.* **11**: e4–e14.
- 705 Finney, M.A. 2005. The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *For. Ecol. Manage.* **211**(1–
706 2): 97–108.

- 707 Wotton, B.M. 2008. Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System
708 in research applications. *Environ. Ecol. Stat.* 16: 107-131.
- 709 Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., et Lampin, C. 2013. A
710 review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environ. Manage.* **51**(3): 651–
711 662. Ganteaume, A., et Jappiot, M. 2013. What causes large fires in Southern France. *For. Ecol.*
712 *Manage.* **294**: 76–85.
- 713 Groupe de travail sur les dangers d'incendie. 1992. Elaboration et structure de la méthode canadienne
714 de prévision du comportement des incendies de forêt - Rapport d'information ST-X-3F. Forêts
715 Canada, Ottawa.
- 716 Groupement d'Interêt Public Aménagement du Territoire et Gestion des Risques. 2008. Plan de
717 Protection des Forêts - Aquitaine. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Bordeaux.
- 718 Heinselman, M.L. 1973. Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. *Quat.*
719 *Res.* **3**(3): 329–382.
- 720 Hély, C., Flannigan, M.D., Bergeron, Y., et McRae, D. 2001. Role of vegetation and weather on fire
721 behavior in the Canadian mixedwood boreal forest using two fire behavior prediction systems. *Can.*
722 *J. For. Res.* **31**(3): 430–441.
- 723 Higuera, P.E., Abatzoglou, J.T., Littell, J.S., et Morgan, P. 2015. The Changing Strength and Nature of Fire-
724 Climate Relationships in the Northern Rocky Mountains, U.S.A., 1902-2008. *PLoS One* **10**(6): 1–21.
- 725 Hirsch, K., Kafka, V., Tymstra, C., McAlpine, R., Hawkes, B., Stegehuis, H., Quintilio, S., Gauthier, S., et
726 Peck, K. 2001. Fire-smart forest management: A pragmatic approach to sustainable forest
727 management in fire-dominated ecosystems. *For. Chron.* **77**(2): 357–363.
- 728 Hirsch, K.G., Corey, P.N. et Martell, D.L. 1998. Using Expert Judgment to Model Initial Attack Fire Crew
729 Effectiveness. *For. Sci.* **44**(4): 539–549.
- 730 Johnston, J.M., Wooster, M.J., Paugam, R., Wang, X., Lynham, T.J., et Johnston, L.M., 2017. Direct

- 731 estimation of Byram's fire intensity from infrared remote sensing imagery. *Int. J. Wildland Fire*
732 26(8): 668-684.
- 733 Kalabokidis, K., Ager, A., Finney, M., Athanasis, N., Palaiologou, P., et Vasilakos, C., 2016. AEGIS: a
734 wildfire prevention and management information system. *Nat. Hazards Earth Sys.* 16: 643-661.
- 735 Kowalski, S., Sartore, M., Burlett, R., Berbigier, P. et Loustau, D., 2003. The annual carbon budget of a
736 French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. *Gl. Change Biol.* 9(7): 1051-1065.
- 737 Lahaye, S., Curt, T., Fréjaville, T., Sharples, J., Paradis, L., et Hély, C. 2018. What are the drivers of
738 dangerous fires in Mediterranean France? *Int. J. Wildl. Fire* **27**(3): 155–163.
- 739 Lampin-Maillet, C., Jappiot, M., Long-Fournel, M., Bouillon, C., Morge, D., et Ferrier, J.P. 2010. Mapping
740 wildland-urban interfaces at large scales integrating housing density and vegetation aggregation
741 for fire prevention in the South of France. *J. Environ. Manage.* **91**(3): 732–741.
- 742 Lertzman, K., Fall, J., et Dorner, B., 1998. Three kinds of heterogeneity in fire regimes: at the crossroads
743 of fire history and landscape ecology. *Northwest Sci.* 72(4): 23.
- 744 Lozano, O.M., Salis, M., Ager, A.A., Arca, B., Alcasena, F.J., Monteiro, A.T., Finney, M.A., Del Giudice, L.,
745 Scoccimarro, E. et Spano, D., 2017. Assessing climate change impacts on wildfire exposure in
746 Mediterranean areas. *Risk analysis*, 37(10), pp.1898-1916.
- 747 Lucas, S. 2009. Tempête Klaus du 24 janvier 2009. *L'If* **21**(1): 12.
- 748 Magnier, C. 2011. Le risque de feux de forêts en France. *Dans Études & documents. Edité par B.*
749 *Trégouët. Ministère de l'Écologie, du Développement, des Transports des Transports et du*
750 *Logement.*
- 751 Marlon, J.R., Bartlein, P.J., Carcaillet, C., Gavin, D.G., Harrison, S.P., Higuera, P.E., Joos, F., Power, M.J., et
752 Prentice, I.C., 2008. Climate and human influences on global biomass burning over the past two
753 millennia. *Nat. Geosci.* 1(10): 697.
- 754 Modugno, S., Balzter, H., Cole, B., et Borrelli, P. 2016. Mapping regional patterns of large forest fires in

- 755 Wildland-Urban Interface areas in Europe. *J. Environ. Manage.* **172**: 112–126. Mora, O., et Banos, V.
 756 2014. La forêt des Landes de Gascogne : vecteur de liens ? *VertigO - la Rev. électronique en Sci.*
 757 *l'environnement* [En ligne] **14**(1).
- 758 Moreira, F., Catry, F.X., Rego, F., et Bacao, F. 2010. Size-dependent pattern of wildfire ignitions in
 759 Portugal: when do ignitions turn into big fires? *Landsc. Ecol.* **25**(9): 1405–1417.
- 760 Moreira, F., Viedma, O., Arianoutsou, M., Curt, T., Koutsias, N., Rigolot, E., Barbati, A., Corona, P., Vaz, P.,
 761 Xanthopoulos, G., Mouillot, F., et Bilgili, E. 2011. Landscape – wildfire interactions in southern
 762 Europe: Implications for landscape management. *J. Environ. Manage.* **92**(10): 2389–2402.
- 763 Moritz, M.A., Batllori, E., Bradstock, R. a., Gill, M., Handmer, J., Hessburg, P.F., Leonard, J., Mccaffrey, S.,
 764 Odion, D.C., Schoennagel, T., et Syphard, A.D. 2014. Learning to coexist with wildfire. *Nature* **515**:
 765 58–66.
- 766 Mouillot, F., Ratte, J.P., Joffre, R., Moreno, J.M., et Rambal, S. 2003. Some determinants of the spatio-
 767 temporal fire cycle in a Mediterranean landscape (Corsica, France). *Landsc. Ecol.* **18**(7): 665–674.
- 768 Navarro, L.M., et Pereira, H.M. 2012. Rewilding Abandoned Landscapes in Europe. *Ecosystems* **15**(6):
 769 900–912.
- 770 Ntaimo, L., Zeigler, B.P., Vasconcelos, M.J., et Khargharia, B. 2004. Forest Fire Spread and Suppression in
 771 DEVS. *Simulation* **80**(10): 479–500.
- 772 Oliveira, T.M., Barros, A.M.G., Ager, A.A., et Fernandes, P.M. 2016. Assessing the effect of a fuel break
 773 network to reduce burnt area and wildfire risk transmission. *Int. J. Wildl. Fire* **25**(6): 619–632.
- 774 Parisien, M.-A., Kafka, V.G., Hirsch, K.G., Todd, J.B., Lavoie, S.G., et Maczek, P.D., 2005. Mapping wildfire
 775 susceptibility with the BURN-P3 simulation model. *Ressources naturelles Canada, Service canadien*
 776 *des forêts, Centre de foresterie du Nord, Rapport d'information NOR-X-405.*(Edmonton, AB).
- 777 Parisien, M.-A., Miller, C., Ager, A.A., et Finney, M.A. 2010. Use of artificial landscapes to isolate controls
 778 on burn probability. *Landsc. Ecol.* **25**(1): 79–93.

- 779 Parisien, M.-A., Miller, C., Parks, S.A., DeLancey, E.R., Robinne, F.-N., et Flannigan, M.D. 2016. The
780 spatially varying influence of humans on fire probability in North America. *Environ. Res. Lett.* **11**(7):
781 75005.
- 782 Parisien, M.-A., Parks, S.A., Krawchuk, M.A., Flannigan, M.D., Bowman, L.M., et Moritz, M.A. 2011. Scale-
783 dependent controls on the area burned in the boreal forest of Canada, 1980-2005. *Ecol. Appl.*
784 **21**(3): 789–805.
- 785 Parks, S.A., Parisien, M.-A., et Miller, C. 2012. Spatial bottom-up controls on fire likelihood vary across
786 western North America. *Ecosphere* **3**(1): 1-20.
- 787 Pimont, F., Dupuy, J.L., et Linn, R.R. 2012. Coupled slope and wind effects on fire spread with influences
788 of fire size: a numerical study using FIRETEC. *International journal of wildland fire*, **21**(7):.828-842.
- 789 Podur, J., et Wotton, B.M. 2011. Defining fire spread event days for fire-growth modelling. *Int. J. Wildl.*
790 *Fire* **20**(4): 497–507.
- 791 Podur, J.J., et Martell, D.L. 2007. A simulation model of the growth and suppression of large forest fires
792 in Ontario. *Int. J. Wildl. Fire* **16**(3): 285–294.
- 793 R Core Team. 2014. R: A Language and environment for Statistical Computing. R Foundation for
794 Statistical Computing, Vienna, Austria. Available from <http://www.r-project.org>.
- 795 Régnier, V. 2016. Les Landes à grands traits. *Insee Anal. Aquitaine-Limousin-Poitou-Charentes*
796 **N°11**(Mars): 4.
- 797 Rigolot, E., et Fernandes, P. 2005. Ecologie du pin maritime en relation avec le feu et gestion des
798 peuplements pour leur protection contre les incendies. *Forêt Méditerranéenne* **XXVI**(1): 97–110.
- 799 Rigolot, E., et Morvan, D. 2003. Evaluation de l'efficacité des coupures de combustible par deux
800 approches: dires d'experts et modélisation. *Forêt Méditerranéenne* **24**(4): 403–418.
- 801 Robinne, F., Parisien, M.-A., et Flannigan, M.D. 2016. Anthropogenic influence on wildfire activity in
802 Alberta, Canada. *Int. J. Wildl. Fire* **25**(11): 1131–1143.

- 803 Ruffault, J., Moron, V., Trigo, R.M., et Curt, T. 2016. Objective identification of multiple large fire
804 climatologies: An application to a Mediterranean ecosystem. *Environ. Res. Lett.* **11**(7).
- 805 Salis, M., Ager, A.A., Alcasena, F.J., Arca, B., Finney, M.A., Pellizzaro, G., et Spano, D. 2014. Analyzing
806 seasonal patterns of wildfire exposure factors in Sardinia, Italy. *Environ. Monit. Assess.* **187**(1):
807 4175.
- 808 Salis, M., Ager, A.A., Arca, B., Finney, M.A., Bacciu, V., Duce, P., et Spano, D. 2012. Assessing exposure of
809 human and ecological values to wildfire in Sardinia, Italy. *Int. J. Wildl. Fire* **22**(4): 549–565.
- 810 Salis, M., Laconi, M., Ager, A.A., Alcasena, F.J., Arca, B., Lozano, O., de Oliveira, A.F., et Spano, D. 2016.
811 Evaluating alternative fuel treatment strategies to reduce wildfire losses in a Mediterranean area.
812 *For. Ecol. Manage.* **368**: 207–221.
- 813 Erni, S., Arseneault, D., Parisien, M.-A., et Bégin, Y. 2016. Spatial and temporal dimensions of fire activity
814 in the fire-prone eastern Canadian taiga. *Glob. Chang. Biol.* **23**(3): 1152–1166.
- 815 Sansilvestri, R. 2015. Evaluation de la capacité adaptative des socio-écosystèmes forestiers face au
816 changement climatique : le cas de la migration assistée. Thèse de doctorat. Paris-Saclay.
- 817 Sargos, J. 2004. Histoire de la Forêt Landaise. Du désert à l'âge d'or. *Edité par* Horizon Chimérique.
818 Bordeaux, France.
- 819 Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Rammer, W., et Verkerk, P.J. 2014. Increasing forest disturbances in Europe
820 and their impact on carbon storage. *Nat. Clim. Chang.* **4**: 806.
- 821 Silva, J., Rego, F., Fernandes, P.M., et Rigolot, E. 2010. Towards integrated fire management: outcomes
822 of the European project Fire Paradox. *Edité par* H. Hasenauer and M. Korhonen. European Forest
823 Institute, Joensuu, Finland.
- 824 Stocks, B.J., Alexander, M.E., Wotton, B.M., Stefner, C.N., Flannigan, M.D., Taylor, S.W., Lavoie, N.,
825 Mason, J.A., Hartley, G.R., Maffey, M.E., Dalrymple, G.N., Blake, T.W., Cruz, M.G., et Lanoville, R.A.
826 2004. Crown fire behaviour in a northern jack pine – black spruce forest. *Can. J. For. Res.* **34**(8):

- 827 1548–1560.
- 828 Timbal, J., et Maizeret, C. 1998. Biodiversité Végétale Et Gestion Durable De La Forêt Landaise De Pin
829 Maritime : Bilan Et Évolution. *Rev fr*: 403–424.
- 830 Thompson, M.P., et Calkin, D.E. 2011. Uncertainty and risk in wildland fire management: a review. *J.*
831 *Environ. Manage.* 92(8): 1895-1909.
- 832 Trabaud, L. 1992. Les Feux de Forêts: Mécanismes, comportement et environnement. *In* 2ème édit.
833 France-sélection, Aubervilliers, France.
- 834 Tymstra, C., Bryce, R., Wotton, M.B., et Armitage, O.B. 2010. Development and structure of Prometheus:
835 the Canadian wildland fire growth simulation Model. Ressources naturelles Canada, Service
836 canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Rapport d'information NOR-X-417.(Edmonton,
837 AB).
- 838 Viegas, D. 2009. Recent forest fire related accidents in Europe. Joint Research Center, Ispra, Italy.
- 839 Van Wagner, C.E. 1987. Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo.
840 Service canadien des forêts, Administration centrale, Ottawa (Ontario). Rapport technique de
841 foresterie 35F. 34 p.
- 842 Van Wagner, C. 1989. Prediction of crown fire in conifer stands. MacIver, Actes du 10e congrès Fire and
843 Forest Meteorology: 207–212.
- 844 Wang, X., Parisien, M.-A., Taylor, S.W., Perrakis, D.D.B., Little, J., et Flannigan, M.D. 2016. Future burn
845 probability in south-central British Columbia. *Int. J. Wildl. Fire* **25**(2): 200–212.
- 846 Wang, X., Wotton, B.M., Cantin, A.S., Parisien, M.-A., Anderson, K., Moore, B., et Flannigan, M.D. 2017.
847 *cffdrs*: an R package for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. *Ecol. Process.* **6**(1): 5.
- 848 Xanthopoulos, G., Caballero, D., Galante, M., Alexandrian, D., Rigolot, E., et Marzano, R. 2006. Forest
849 Fuels Management in Europe. *Dans* Fuels Management—How to Measure Success: Actes de

850 conférence.28-30 March 2006; Portland, OR.Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins,CO: U.S. Department
851 of Agriculture,Forest Service, Rocky Mountain Research Station. pp. 29–46.

852

Tableau 1. Format des variables d'entrée (c.-à-d., intrants) utilisées pour Burn-P3. Les détails se retrouvent dans le texte.

Nom	Type	Source	Description
Intrants spatiaux			
Relief	Raster (numérique)	BD-TOPO (IGN)	Altitude (m)
Combustibles	Raster (catégorique)	GIP-ATEGERI (Ilots de reconstitution), SDIS (Ilots de nettoyage), IFN (Dégâts forestiers), IGN (MNT)	Combustibles et non-combustibles tels que décrits dans le système de Prévion du comportement des incendies
Zones météo	Raster (catégorique)	Météo-France	Zones caractérisées par une météorologie relativement uniforme (5 zones)
Grilles d'allumages	Raster (numérique)	GIP-ATEGERI, SDIS40	Probabilité relative d'allumage pour chaque cause (2 grilles: humaine et naturelle)
Intrants tabulaires			
Saisons	Classes (catégorique)	SDIS40 (et analyses des données)	Période de la saison avec une météo et un stade phénologique (feuillaison et séchage des herbes) relativement uniforme; 3 saisons: début printemps (15 mars au 14 mai), fin printemps (15 mai au 14 août), été (15 août au 15 octobre)
Nombre de feux	Distribution de fréquence (numérique)	GIP-ATEGERI, SDIS40	Nombre de feu ≥ 0.5 par itération (de 0 à 120 feux)
Proportion d'allumages par cause et saison	Distribution de fréquence (numérique)	GIP-ATEGERI, SDIS40	Proportion du total (pourcentage) du nombre d'allumage pour chaque combinaison de cause et de saison

Durée des feux	Distribution de fréquence (numérique)	GIP-ATEGERI, SDIS40	Nombre d'heures de propagation par feu (durée des feux); tous les scénarios brûlent pendant une journée, sauf le scénario Hollywood (xx% des feux brûlent 2 jours)
Données météo quotidiennes	Liste des conditions de propagation (numérique)	Météo-France	Liste des conditions météo quotidiennes et leur composantes de la méthode de l'Indice forêt-météo; la liste est stratifiée par saison et par zone météo

857
858
859
860

861 **Tableau 2.** Description des paramètres de danger d'incendie pour chaque scenario météorologique

Scénario	Critère météo	Durée quotidienne de propagation (heures): min-max (moyenne)
Réaliste	IFM ≥ 13	Début du printemps: 1 à 6 (2.5) Fin du printemps: 1 à 8 (3.5) Été: 1 à 10 (4.25)
Modéré	IFM ≥ 13 et < 19	Début du printemps: 1 à 3 (1.25) Fin du printemps: 1 à 4 (1.75) Été: 1 à 5 (2.25)
Élevé	IFM ≥ 19 et < 28	Début du printemps: 1 à 6 (2) Fin du printemps: 1 à 8 (3.5) Été: 1 à 10 (4.5)
Extrême	IFM ≥ 28	Début du printemps: 1 à 8 (3) Fin du printemps: 1 à 12 (5.25) Été: 1 à 15 (6.75)
Hollywood	IPI ≥ 12 (printemps) IFM ≥ 36 (été)	Début du printemps: 1 à 12 (4) Fin du printemps: 1 à 16 (7) Été: 1 à 20 (9)

862

863

864

865

Tableau 3. Statistiques descriptives des résultats pour chaque scénario météorologique

Scénario de danger	Probabilité	Puissance
Réaliste	0-3.41 ($\bar{x}$ = 0.53 - σ = 0.517)	0-86671 ($\bar{x}$ = 2871 - σ = 3217)
Modéré	0-1.29 ($\bar{x}$ = 0.11 - σ = 0.147)	0-16782 ($\bar{x}$ = 521 - σ = 913)
Élevé	0-3.79 ($\bar{x}$ = 0.51 - σ = 0.511)	0-27101 ($\bar{x}$ = 1421 - σ = 1990)
Extrême	0-13.6 ($\bar{x}$ = 3.01 - σ = 2.394)	0-49606 ($\bar{x}$ = 5210 - σ = 5544)
Hollywood	0-28.64 ($\bar{x}$ = 8.55 - σ = 6.288)	0-55738 ($\bar{x}$ = 7832 - σ = 8185)

866

867

868

869

870

871

Titres des figures

Figure 1. Situation géographique du département des Landes, France (a), les villes et routes principales (b) et la localisation des départs de feux de ≥ 0.5 ha de 2004 à 2014, toutes causes confondues (c).

Figure 2. Variables spatiales nécessaires au fonctionnement du modèle Burn-P3, avec (a) les combustibles du système de Prévion du comportement des incendies, (b) la topographie, (c) les zones-météo et les stations utilisées pour la modélisation et (d) la densité des allumages anthropiques et (e) naturels.

Figure 3. a) Distribution des valeurs de l'indice forêt-météo pour chaque scénario de danger de feu ; b) la distribution par an des départs de feux réels (en gris) et la distribution lissée intégrée dans Burn-P3 (ligne rouge); c) la fréquence du nombre d'heures de propagation, qui varie en fonction de la saison et du scénario météo (voir méthodes).

Figure 4. Résultats du scénario réaliste : (a) probabilités annuelle d'incendie, (b) puissance du front de flamme et (c) le produit des cartes (a) et (b), qui constitue l'aléa incendie de forêt pour le département des Landes.

Figure 5. Résultats pour chaque scénario de danger de feu, avec la probabilité d'incendie brute (a), la probabilité d'incendie normalisée (b), a puissance du front de flamme en Méga-kilowatts par mètre linéaire (c).

Figure 1

Figure 2

Figure 3

919 **Figure 4**

920

921 **Figure 5**

922

923